

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет»**

**Кафедра Теоретической механики и оборудования  
целлюлозно-бумажных производств**

**Санников А.А.  
Исаков С.Н.**

## **Лабораторные работы по трибологии и триботехнике**

**Методические указания по выполнению лабораторных работ  
для студентов ИЛБидС**

Екатеринбург 2015

**Содержание**

	Стр.
1. Определение коэффициента трения скольжения на горизонтальной плоскости	3
2. Определение механических характеристик электродвигателя с помощью тормозного устройства	7
3. Определение коэффициента трения покоя	9
4. Изучение конструкции машины трения СМЦ-2	13
5. Исследование трибологических свойств материалов на трибометре СМЦ-2	17
6. Определение параметров автофрикционных колебаний	23
7. Исследование трибологических свойств материалов на трибометре СМЦ-2	29
8. Изучение способов смазки и классификации смазок	33
9. Изучение конструкции подшипников	37
Приложение	45

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Цель работы: определение коэффициента трения скольжения для различных материалов.

Сущность этого метода (рис. 1.1) заключается в том, что тело А двигают с постоянной скоростью относительно тела В и измеряют необходимую для этого силу Р, так как движение тела равномерное, то сила трения F равна по величине силе Р и противоположна ей по направлению.

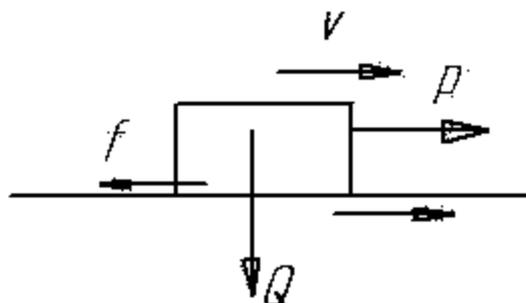


Рис. 1.1. Схема действия сил

Для определения коэффициента трения скольжения, в лабораторной работе, используется прибор ТММ-32, разработанный СКБ и предназначенный для определения коэффициента сухого трения и трения несмазанных тел (рис. 1.2).

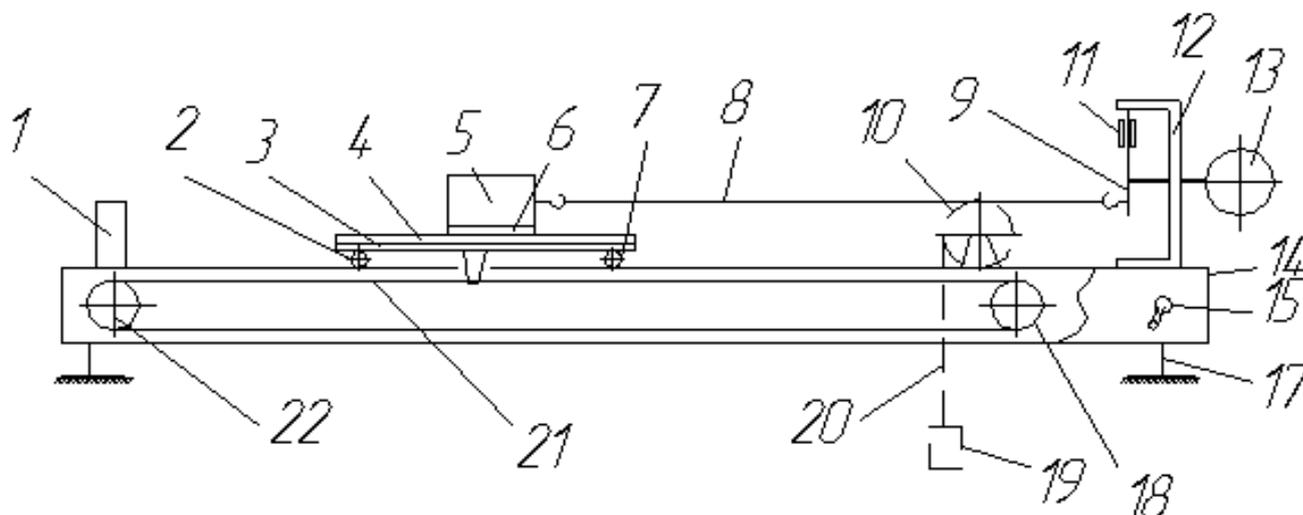


Рис. 1.2. Схема установки ТММ-32.

Основной частью прибора является каретка 3, имеющая поступательное движение на роликах 2 по основанию 14. Движение каретки осуществляется при помощи бесконечного троса 21, надетого на ролики 18 и 22. Ролик 22 получает вращение от реверсивного электродвигателя через червячный редуктор. На каретке 3 крепятся сменные плиты 4, выполненные из различных материалов.

Верхний часть этих пакт служит одной из плоскостей трения. На плиту укладывается испытуемый образец 5. Основания 6 образца сменные и выполнены из разных материалов. Нижняя поверхность их служит второй плоскостью трения. Для приведения плоскости трения горизонтальное положение корпус прибора 14 снабжен установочными винтами 17. Образца 5 с помощью жесткого троса 8 прикрепленного к балке 9, выполненной на пружинной закаленной стали и закрепленной на кронштейне 12. К кронштейну 12 прикреплен также индикатор 13, который измерительным наконечником упирается в балку 9. При движении каретки 3 влево образец 5, лежащий на каретке, стремится сдвинуться вместе с кареткой и тянет за собой через трос 8 балку 9, балка 9, начинает изгибаться, развивает усилие, которое удерживает образец 5 на месте, при этом образец 5 скользит по плите 4. Вес образца равен  $Q$ , сила трения  $F$ , приложенная к образцу со стороны каретки, равняется  $\mu \cdot Q$ , где  $\mu$  — коэффициент трения между плитой 4 и основанием 6. Эта сила трения целиком без всяких потерь воспринимается балкой 9. Деформации изгиба балки 9 измеряются индикатором 13. Отсчет показания шкалы индикатора в миллиметрах по вспомогательной таблице переводится в ньютонны и дает величину силы трения. В силу скачкообразного характера трения и изменчивости его величины для различных участков плоскости плиты 4 отсчет значений величины силы трения визуально по шкале индикатора 13 сделать не удастся. Стрелка индикатора 13 довольно быстро колеблется в некотором диапазоне шкалы. Можно отметить крайние положения стрелки и соответствующее им среднее положение, следовательно, по индикатору 13 можно определить только среднее значение силы трения.

Движение каретки 3 производится вправо или влево. Пуск осуществляется переключателем 15. Остановка каретки в крайних положениях автоматическая, для чего в корпусе 14 прибора смонтировано два концевых выключателя. Тарировка показаний индикатора производится с помощью грузиков известного веса, подвешенных на нити 20 перекинутой через блок 10. Индикатор 13 устанавливается на нуль в тот момент, когда балка 9 ничем не нагружена.

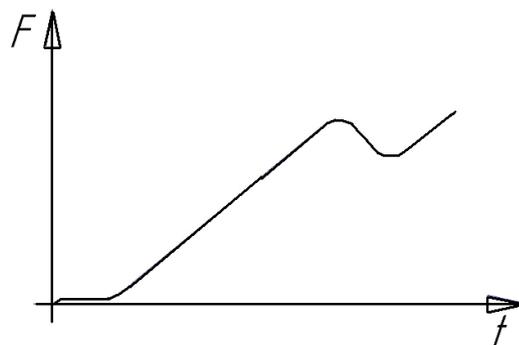


Рис. 1.3. Зависимость усилия от движения каретки.

На рис. 1.3 показана осциллограмма записи силы трения, определенного на приборе ТММ-32, при жесткой связи между образцом 5 и измерительной балкой 9.

Порядок проведения работы

Принадлежности для работы: прибор ТММ-32, набор сменных плит и сменных колец к грузу, тарировочное устройство для индикатора.

Работу одним прибором ТММ-32 проводят 3 - 4 студента.

1. Прибор ТММ-32 ставится на краю стола с таким вылетом, чтобы груз 19 (рисунок 1.1) свободно проходил, не задевая за стол. Устанавливается тарировочный ролик 10. К точной стрелке индикатора при снятом грузе подводится нулевое деление шкалы. Через ролик 10 перекидывается нить, один конец которой прикрепляется к балке 9, к другому концу подвешивается груз. Для нескольких грузов, разной величины, записывают показания индикатора, составляют тарировочный график (рис. 1.4) и определяют масштабный коэффициент  $K$  Н/мм (отношение веса груза к соответствующему показанию индикатора).

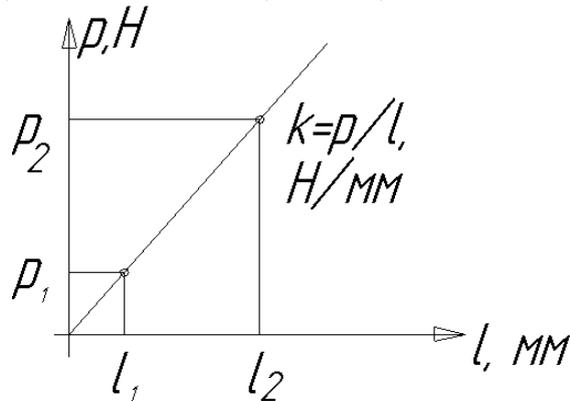


Рис. 1.4. Тарировочный график

2. По окончании тарировки тарировочное устройство снимают, прибор устанавливают на столе (по уровню) в горизонтальном положении и подключают к питанию. Сменные плиты и кольца образцов протирают тряпочкой, смоченной бензином или растворителем, и дают им высохнуть.

3. В соответствии с указанными преподавателем сочетаниями материалов трущихся тел устанавливают на каретку 3 плиту 4 и крепят, к грузу 5 кольцо 6. Отсчет по точной шкале индикатора ставят на нуль. Груз 5 и балку 9 соединяют тягой 8.

4. Тумблером (включателем) 15 включают двигатель 1, который начинает медленно передвигать каретку влево. За время движения каретки снимают несколько отсчетов по индикатору. Среднее показание записывают в бланк. Опыт повторяют три раза с различными сочетаниями материалов, результаты записывают в протокол. Сила трения определяется как произведение отсчета по индикатору на тарировочно-переводной коэффициент  $k, \left[ \frac{H}{мм} \right]$

$$F = k \cdot L, H \tag{1-1}$$

где  $L$  — отсчет по индикатору в мм, берущийся как разность отсчета при измерении силы трения и нулевого отсчета, с учетом грубой шкалы индикатора.

Коэффициенты трения определяются как отношение силы трения  $F$  к весу образца  $Q$ :

$$\mu = F / Q \quad (1-2)$$

Таблица 1.1

Технические характеристики установки ТММ-32

Основные параметры прибора ТММ-32	Ед. измерения.	Значение
Максимальное относительное перемещение образцов	мм	300
Скорость перемещения	м/сек	0.1
Вес испытываемых образцов	кг	4.5
Материалы сменных плит	сталь, чугун, дюралюминий	
Материал сменных колец испытываемых образцов	сталь, чугун, латунь	
Питание двигателя	В	127
	Гц	50
Максимальная сила трения	кгс	2,0
Габариты	мм	1540x140x205
Потребляемая мощность	Вт	13
Вес	кг	40

Таблица 1.2

Справочная информация

Материалы трущихся тел	Коэффициент трения скольжения	
	сухое	со смазкой
Сталь – сталь	0,15	0,05-0,1
Сталь – мягкая сталь	0,2	0,1-0,2
Сталь - чугун	0,15-0,2	0,05-0,15
Сталь - бронза	0,15-0,18	0,1-0,15
Чугун - бронза	0,15-0,2	0,07-0,15
Бронза - бронза	0,2	0,07-0,1
Чугун - чугун	0,15-0,2	0,07-0,12
Сталь - дюралюминий	0,16-0,2	
Сталь - текстолит	0,2	

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ТОРМОЗНОГО УСТРОЙСТВА

Цель работы: определение значений момента на валу двигателя для нескольких значений угловой скорости его и построение графика зависимости  $M = M(\omega)$ , и  $N = N(\omega)$ .

Механические характеристики нужны для подбора двигателя к рабочей машине. Ниже излагаются методы экспериментального определения механических характеристик двигателей.

На рисунок 2.1 изображена принципиальная схема тормозного устройства для определения механических характеристик небольших электродвигателей.

На металлическом основании 1 установлена жесткая рама 2 и двигатель 3, характеристика которого подлежит определению. В верхней части рамы 2 на винте 8 установлена траверса 6. К траверсе 6 на винтах 9 подвешено две тарированных пружины 10. Нижние концы пружин прикреплены к ремню 12, охватывающему шкив 4 двигателя. В местах присоединения ремня к пружинам, к ремню прикреплены указатели 11. На раме 2 установлены также две шкалы 5. При снятом со шкива 4 ремне указатели 11 устанавливаются винтами 9 так, чтобы на шкалах 5 отсчеты были одинаковыми. Затем ремень 12 надевается на шкив 4 и при помощи гайки 7 траверса подтягивается вверх, одинаково растягивая пружины 10. Натяжение ветвей ремня 12 также будет одинаковое. При пуске двигателя (с вращением по стрелке, рис. 2.1) вследствие трения между ремнем 12 и шкивом 4 разовьется тормозной момент. Натяжение правой ветви ремня увеличится, натяжение левой ветви ремня уменьшится.

Величина передающегося окружного усилия будет равна разности натяжений ремней:  $P = S_1 - S_2$  (независимо от коэффициента трения пары «ремень – шкив»). Если жесткость пружины равна  $k$  Н/мм и разность отсчетов по шкалам 5 равна  $l$  мм, то  $P = k \cdot l$  Н.

Вместо разницы отсчетов  $l$  можно для каждой пружины брать разницу отсчетов отдельно между положением указателя во время запуска двигателя и положением указателя при остановке двигателя. Тогда разница прогибов пружин определится, как сумма величин  $l_1$  и  $l_2$ .

Угловая скорость ротора двигателя измеряется тахометром (для маленьких двигателей лучше стробоскопическим тахометром, чтобы не вносить добавочных погрешностей). Подтягивая от опыта к опыту траверсу вверх и усиливая тем самым общее натяжение пружин, создаются увеличивающиеся тормозные моменты, для каждого из которых измеряется угловая скорость ротора. Имея ряд значений окружных усилий и соответствующих им угловых скоростей ротора, легко получить механическую характеристику двигателя:

$$M = M(\omega), \quad (2-1)$$

где  $M = P \cdot R$ ,

а также зависимость между мощностью и угловой скоростью

$$N = N(\omega), \text{ где } N = M \cdot \omega = R \cdot P \cdot \omega$$

В этих формулах  $R$  — радиус шкива, а  $P$  — окружное усилие на ободу его.

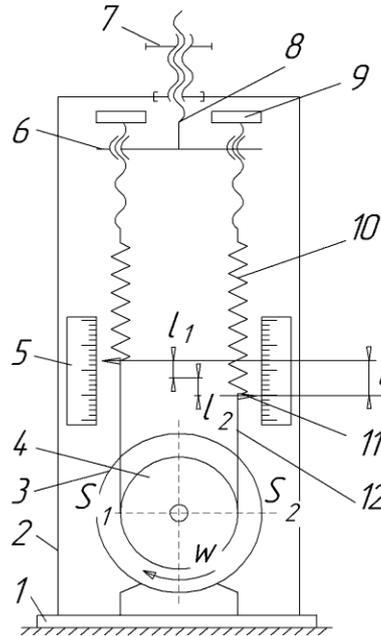


Рис. 2.1. Схема тормозного момента

Таблица 2.1

Технические характеристики установки

Основные параметры прибора	Ед. измерения.	Значение
Электродвигатель		
Тип		МУН-100/80
Мощность	Вт	80
Номинальное число оборотов	об/мин	2000
Напряжение	В	110
Наибольшее усилие динамометров	кг	2
Диаметр шкива	мм	60
Габариты	мм	1540x140x205
Вес	кг	15

Результаты измерений и расчетов записать в табл. 2.2 и построить графики  $N = N(\omega)$

Таблица 2.2

Результаты экспериментов

Номер опыта	Предварительное натяжение, Н	Угловая скорость	Мощность, Вт

Лабораторная работа №3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПОКОЯ

Цель работы: расчет коэффициентов трения и сил трения покоя для различных материалов.

В лабораторной работе используется прибор ТММ-32, представленный на рис. 3.1, а.

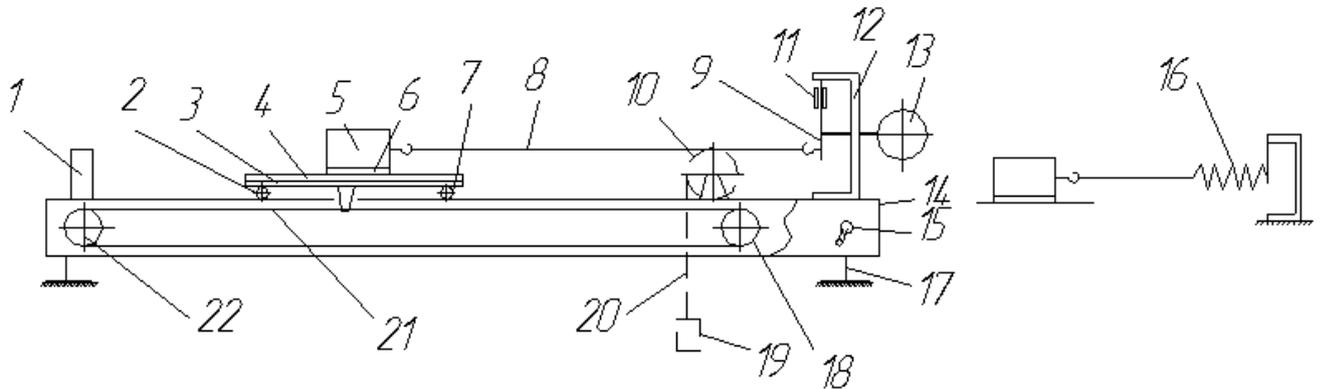


Рис. 3.1. Схема установки ТММ-32

Основной частью прибора является каретка 3, имеющая поступательное движение на роликах 2 по основанию 14. Движение каретки осуществляется при помощи бесконечного троса 21, надетого на ролики 18 и 22. Ролик 22 получает вращение от реверсивного электродвигателя через червячный редуктор. На каретке 3 крепятся сменные плиты 4, выполненные из различных материалов. Верхний часть этих плит служит одной из плоскостей трения. На плиту укладывается испытуемый образец 5. Основания 6 образца сменные и выполнены из разных материалов. Нижняя поверхность их служит второй плоскостью трения. Для приведения плоскости трения горизонтальное положение корпуса прибора 14 снабжен установочными винтами 17. Образца 5 с помощью жесткого троса 8 прикрепленного к балке 9, выполненной на пружинной закаленной стали и закрепленной на кронштейне 12. К кронштейну 12 прикреплен также индикатор 13, который измерительным наконечником упирается в балку 9. При движении каретки 3 влево образец 5, лежащий на каретке, стремится сдвинуться вместе с кареткой и тянет за собой через трос 8 балку 9, балка 9, начинает изгибаться, развивает усилие, которое удерживает образец 5 на месте, при этом образец 5 скользит по плите 4. Вес образца равен  $Q$ , сила трения  $F$ , приложенная к образцу со стороны каретки, равняется  $\mu \cdot Q$ , где  $\mu$  — коэффициент трения между плитой 4 и основанием 6. Эта сила трения целиком без всяких потерь воспринимается балкой 9. Деформации изгиба балки 9 измеряются индикатором 13. Отсчет показания шкалы индикатора в миллиметрах по вспомогательной таблице переводится в ньютон и дает величину силы трения. В силу скачкообразного характера трения и изменчивости его величины для различных участков плоскости плиты 4 отсчет значений величины силы трения визуальнo по шкале индикатора

13 сделать не удастся. Стрелка индикатора 13 довольно быстро колеблется в некотором диапазоне шкалы. Можно отметить крайние положения стрелки и соответствующее им среднее положение, следовательно, по индикатору 13 можно определить только среднее значение силы трения.

Движение каретки 3 производится вправо или влево. Пуск осуществляется переключателем 15. Остановка каретки в крайних положениях автоматическая, для чего в корпусе 14 прибора смонтировано два концевых выключателя. Тарировка показаний индикатора производится с помощью грузиков известного веса, подвешенных на нити 20 перекинутой через блок 10. Индикатор 13 устанавливается на нуль в тот момент, когда балка 9 ничем не нагружена.

На приборе ТММ-32 требуется определить силу трения при страгивании. Для этого жесткий трос 8, соединяющий образец 5 с балкой 9, надставляется пружиной 16 (рис. 3.1, б). Жесткость пружины 16 небольшая, поэтому нарастание силы, приложенной к образцу 5, будет происходить плавно. Образец 5 вначале будет двигаться вместе с кареткой 3. Движение образца относительно каретки начнет происходить только тогда, когда пружина разовьет усилие, равное силе трения покоя (страгивания). Этот момент нетрудно установить по индикатору 13, так как стрелка индикатор при малой жесткости пружины движется плавно и медленно.

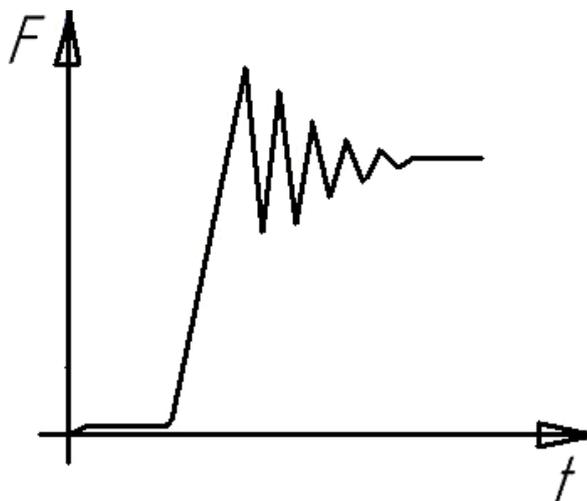


Рис. 3.2. Зависимость усилия от движения каретки.

На рис. 3.2 показана осциллограмма записи силы трения, определенного на приборе ТММ-32, при упругой связи образца 5 с измерительной балкой 9.

### Порядок проведения работы

Принадлежности для работы: прибор ТММ-32, набор сменных плит и сменных колец к грузу, тарировочное устройство для индикатора.

Работу одним прибором ТММ-32 проводят 3 - 4 студента.

1. Прибор ТММ-32 ставится на краю стола с таким вылетом, чтобы груз 19 (рис. 3.1) свободно проходил, не задевая за стол. Устанавливается тарировочный ролик 10. К точной стрелке индикатора при снятом грузе подводится нуле-

вое деление шкалы. Через ролик 10 перекидывается нить, один конец которой прикрепляется к балке 9, к другому концу подвешивается груз. Для нескольких грузов, разной величины, записывают показания индикатора, составляют тарировочный график (рисунок 3.3) и определяют масштабный коэффициент  $K$  Н/мм (отношение веса груза к соответствующему показанию индикатора).

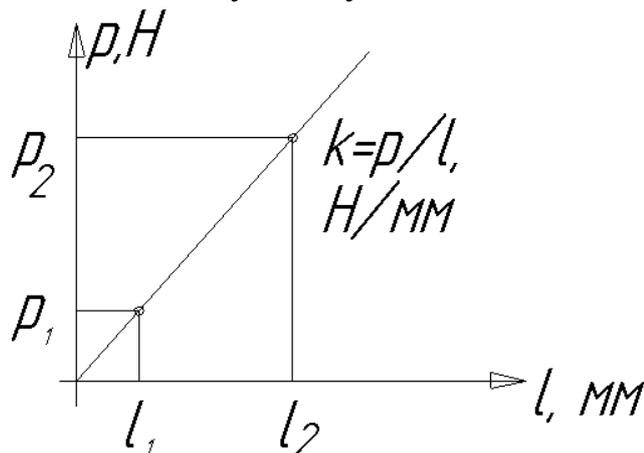


Рис. 3.3. Тарировочный график

2. По окончании тарировки тарировочное устройство снимают, прибор устанавливают на столе (по уровню) в горизонтальном положении и подключают к питанию. Сменные плиты и кольца образцов протирают тряпочкой, смоченной бензином или растворителем и дают им высохнуть.

3. В соответствии с указанными преподавателем сочетаниями материалов трущихся тел устанавливают на каретку 3 плиту 4 и крепят, к грузу 5 кольцо 6. Отсчет по точной шкале индикатора ставят на нуль. Груз 5 и балку 9 соединяют тягой 8.

4. Тумблером (включателем) 15 включают двигатель 1, который начинает медленно передвигать каретку влево, снимается кривая изменения силы трения при страгивании. Среднее показание записывают в бланк. Опыт повторяют три раза с различными сочетаниями материалов, результаты записывают в протокол. Сила трения определяется как произведение отсчета по индикатору на тарировочно-переводной коэффициент  $k, \left[ \frac{H}{мм} \right]$

$$F = k \cdot L, H \quad (3-1)$$

где  $L$  — отсчет по индикатору в мм, берущийся как разность отсчета при изменении силы трения и нулевого отсчета, с учетом грубой шкалы индикатора.

Коэффициенты трения определяются как отношение силы трения  $F$  к весу образца  $Q$ :

$$\mu = F / Q \quad (3-2)$$

5. График силы трения при страгивании, прикладываются к бланку работы.

Технические характеристики установки ТММ-32

Основные параметры прибора ТММ-32	Ед. измерения.	Значение
Максимальное относительное перемещение образцов	мм	300
Скорость перемещения	м/сек	0.1
Вес испытуемых образцов	кг	4.5
Материалы сменных плит	сталь, чугун, дюралюминий	
Материал сменных колец испытуемых образцов	сталь, чугун, латунь	
Питание двигателя	В	127
	Гц	50
Максимальная сила трения	кгс	2,0
Габариты	мм	1540x140x205
Потребляемая мощность	Вт	13
Вес	кг	40

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАШИНЫ ТРЕНИЯ СМЦ-2

Цель работы: изучение конструкции машины трения СМЦ-2 и её измерительных возможностей.

Общие сведения

Машины трения— широкий класс устройств, предназначенных для изучения процессов трения и вызванного трением износа, свойств смазочных и фрикционных материалов при комнатных и при повышенных температурах и т.п.

Из-за различного характера, актуальных с промышленной точки зрения, процессов трения существуют машины трения различной конфигурации в зависимости от характера измеряемых процессов, которые представлены на рис. 4.1:

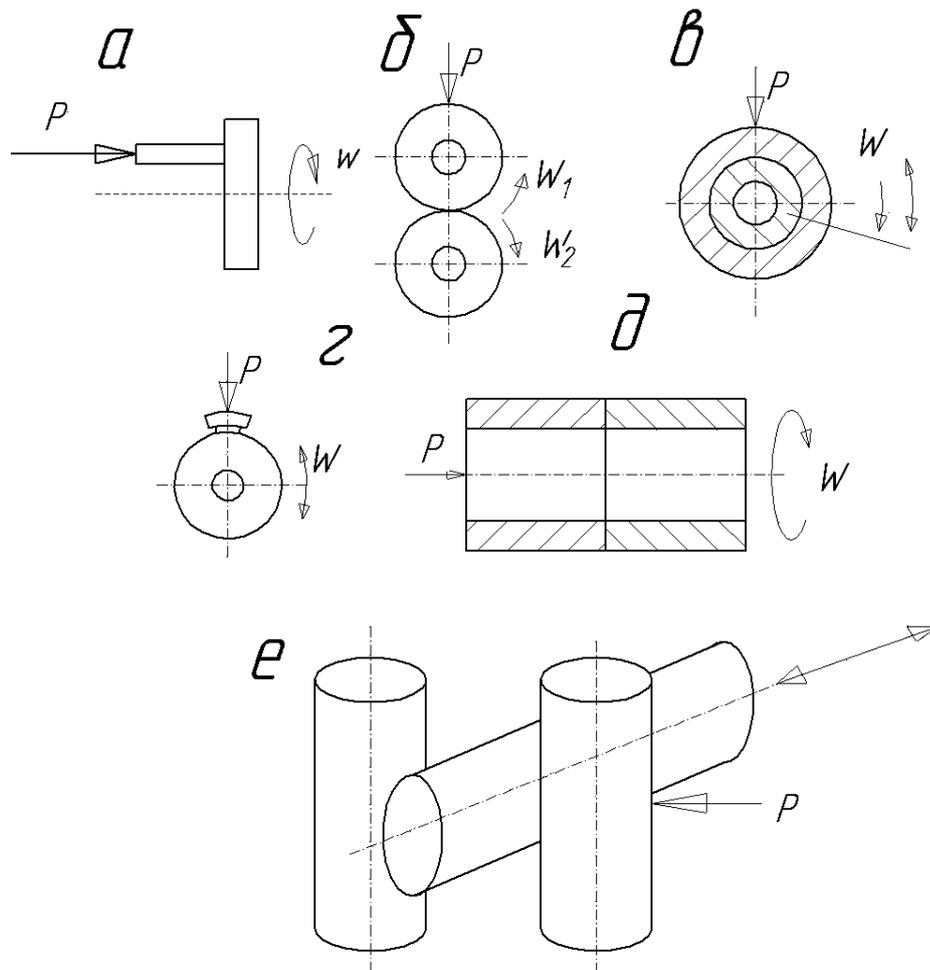


Рис. 4.1 Трибологические системы: а - «диск-палец», б - «диск-диск», в - «кольцо-кольцо», г - «диск-колодка», д – «торец - торец», е – «цилиндр-цилиндр»

Универсальная машина трения имеет комбинированные насадки для проведения испытаний по нескольким типам взаимодействия. Основными показателями, по которым характеризуют машины трения, являются:

диапазон измерения силы, создаваемой машиной трения;  
 диапазон измерения момента силы трения;  
 диапазоны измерения частоты вращения;  
 геометрические характеристики (радиусы установки образцов, пределы изменения угла качания образца, пределы измерения величины хода поступательного перемещения).

Одной из характеристик условий контактного взаимодействия в модельной трибосистеме является коэффициент взаимного перекрытия  $K_{\text{вз}}$ , определяющийся отношением площади поверхности трения образца  $A_{\text{обр}}$  и контртела  $A_{\text{к}}$ .

$$K_{\text{вз}} = \frac{A_{\text{обр}}}{A_{\text{к}}} \quad (4-1)$$

Величина коэффициента взаимного перекрытия определяет развитие тепловых процессов в элементах трибомеханической системы.

Трибометр СМЦ-2, являясь модификацией машины трения Амслера, предназначен для испытания материалов на износ и определение их фрикционных свойств в условиях трения скольжения и трения качения при нормальных температурах для модельных трибосистем, схема которых представлена на рис. 1- «диск-диск» (б), «втулка-вал» (в), «диск-колодка» (г).

Схема (б) «ролик по ролику» применяется для испытаний на изнашивание в условиях трения качения или трения качения с проскальзыванием. При этом, основным видом изнашивания является усталостное выкрашивание (питтинг). Такие испытания позволяют определить контактную выносливость (усталость) металла. Схема (г) «диск-колодка» моделирует процесс изнашивания при трении скольжения и применяется для испытаний на изнашивание при сухом и граничном трении, а так же, при испытаниях на абразивное (гидроабразивное) изнашивание. В последнем случае в зону трения подводится смесь абразива с водой или маслом. Схема (в) «вал-втулка» позволяет реализовать испытание на изнашивание при жидкостном трении (гидростатическом или гидродинамическом). С этой целью машина СМЦ-2 снабжена закрытой камерой смазки, куда подается масло под давлением.

Пару трения «диск-диск» используют для моделирования работы трибосопряжений с линейным контактом элементов, таких как «колесо-рельс» (например крановые ходовые колёса, перемещающиеся по рельсу) или зубчатое зацепление. При взаимном обкатывании взаимодействующих дисков с некоторым проскальзыванием в зоне их контакта возникают условия нагружения материала, соответствующие нагружению материала зубчатого колеса в какой-либо точке линии контакта (зацепления).

Пара трения «диск-колодка» используется для моделирования работы трибосопряжений сухого и граничного трения (тормозные колодки и др.). При использовании модельной трибосистемы «втулка-вал» возможно исследование гидродинамической опоры трения.

Трибометр укомплектован приспособлениями для тарировки его силовых систем, а также для проведения испытаний элементов модельных трибосистем «диск – диск» и «диск – колодка» в жидких средах предусмотрено использование специальных камер.

Кинематическая схема трибометра представлена на рис. 4.2. Привод вращения образца 8 и контртела 9 осуществляется от электродвигателя 1 посредством клиноременной передачи 2 и шестерен 3. Клиноременная передача со сменными шкивами, позволяет проводить испытания при малых нагрузках на образце.

В каретке 5, поворачивающейся вокруг оси вала 4, расположены сменные шестерни 6, работающие в масляной ванне, для привода образца 8. Передаточное отношение этих шестерен определяет степень проскальзывания образца и контртела при испытаниях на трение качения с проскальзыванием.

Для проведения исследований работоспособности трибосистемы в жидких средах трибометр оснащен специальной камерой.

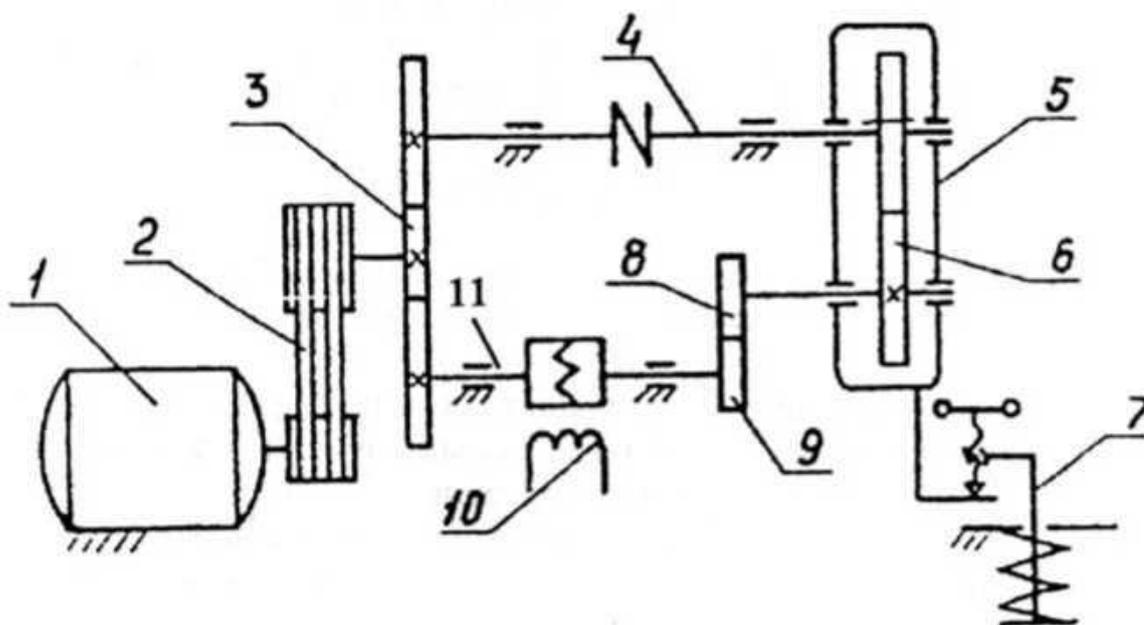


Рис. 4.2. Кинематическая схема трибометра СМЦ-2

1 - электродвигатель, 2 - клиноременная передача со сменными шкивами, 3 - шестерни привода образца и контртела, 4 - промежуточный вал, 5 - каретка, 6 - сменные шестерни привода образца, 7 - нагружающее устройство, 8 - образец, 9 - контртело, 10 - индукционный датчик момента трения, 11- торсион

Момент трения измеряется бесконтактным индуктивным датчиком 10 по скручиванию торсионного вала 11, на котором закреплено контртело 9. Регистрацию момента трения производят самопишущим потенциометром типа КСП-2.

Каретка консольно крепится в бабе нижнего образца. Каретка может быть снята с машины для установки и работы с камерой для образцов «вал-втулка».

Чтобы исключить нагрузку на образцы от неуравновешенных масс консольно закреплённой каретки на машине имеется противовес, который размещается внутри станины машины.

Для измерения крутящего момента на машине используют бесконтактный индуктивный датчик, состоящий из двух частей: вращающегося ротора и неподвижного статора. Основной частью ротора является торсион. Во время испытания возникает момент трения, который скручивает вал нижнего образца. Второй конец вала соединён с торсионом датчика, который воспринимает этот же момент. Под его действием торсион скручивается, а крайние кольца ротора смещаются относительно среднего кольца в разные стороны на равные углы. При этом меняется магнитный поток, следовательно происходит изменение ЭДС. Электрические сигналы подаются на потенциометр.

*Подготовка машины к работе.* Установить образцы на валу таким образом, чтобы радиальное биение их при проворачивании от руки не превышало 0,1 мм.

#### Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию трибометра .
2. Рассмотреть реализацию на трибометре испытания в условиях.
3. Изучить теорию трения качения и скольжения.
4. Рассмотреть систему нагружения образца.
5. Рассмотреть систему измерения и регистрации момента трения.
6. Оформить протокол лабораторной работы, содержащий кинематическую схему трибометра, эскизы образцов и контртела.

Таблица 4.1

Технические характеристики трибометра СМЦ-2

№	Параметр	Ед. изм.	Значение
1	Частота вращения вала контртела	об/мин	300, 500, 1000
2	Коэффициент проскальзывания круглых образцов с одинаковыми диаметрами	%	0, 10, 15, 20
3	Максимальный момент трения	Н·м	15
4	Диапазон изменения момента трения	Н·м	1,5...15
5	Диапазон измерения нагрузки - «диск-диск»; «диск-колодка» - «вал-штулка»	Н	200-2000 500-5000
6	Потребляемая мощность	кВт	2,2
7	Предел допускаемой погрешности коэффициента проскальзывания	%	±5
8	Предел допускаемой погрешности числа оборотов контртела от измеряемой величины	%	±10

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА ТРИБОМЕТРЕ СМЦ-2

Цель работы: изучение работы трибометра СМЦ-2 с различными модельными трибосистемами; освоение методик определения износа образцов и силы трения, расчёта характеристик изнашивания

*Трибологические свойства* - свойства материала, определяемые при нагружении в условиях модельной трибосистемы. Важнейшими определяемыми трибологическими характеристиками материала являются: износ и сила трения. В соответствии с требованиями ГОСТ 27674 - 88 "Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения" можно дать следующие определения:

*Износ* - результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Значение износа может быть выражено в единицах длины (линейный износ  $\Delta h = h_0 - h_1$ ), объёма (объёмный износ  $\Delta V = V_0 - V_1$ ), массы (износ по массе  $\Delta m = m_0 - m_1$ ) и др.

*Сила трения* - сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между этими телами.

Износ характеризует потерю металла при работе трибосопряжения и определяет долговечность узла трения. Энергетические потери от трения (работа силы трения) весьма существенны. При этом выделяющаяся энергия рассеивается в окружающую среду, величина её оказывает влияние на коэффициент полезного действия механизма. Кроме того фрикционный разогрев контактирующих поверхностей деталей сопряжения может привести к смене вида нарушения фрикционной связи и также повлиять на долговечность узла трения в сторону его снижения.

В трибологических испытаниях приняты следующие количественные характеристики процесса изнашивания: износ (линейный, объёмный, массовый), скорость изнашивания, интенсивность изнашивания, износостойкость.

Износ - экспериментально определяемая величина. Скорость и интенсивность изнашивания - расчётные величины.

*Скорость изнашивания* - отношение величины износа  $\Delta h$  к интервалу времени  $\Delta t$ , в течение которого он имел место

$$\gamma_h = \frac{\Delta h}{\Delta t} \left[ \frac{\text{мм}}{\text{с}} \right], \gamma_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \left[ \frac{\text{мг}}{\text{с}} \right], \gamma_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \left[ \frac{\text{мм}^3}{\text{с}} \right] \quad (5-1)$$

*Интенсивность изнашивания* - отношение величины износа  $\Delta h$  к обусловленному пути  $\Delta L$ , на котором он имел место, или к объёму выполненной работы

$$I_h = \frac{\Delta h}{\Delta L} \left[ \frac{\text{мм}}{\text{м}} \right], I_m = \frac{\Delta m}{\Delta L} \left[ \frac{\text{мг}}{\text{м}} \right], I_v = \frac{\Delta V}{\Delta L} \left[ \frac{\text{мм}^3}{\text{м}} \right] \quad (5-2)$$

Величины, обратные приведённым (5-2) называются износостойкостью.

*Износостойкость* - свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определённых условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Для сравнительной оценки износостойкости группы материалов принято использовать относительную износостойкость.

*Относительная износостойкость*  $\varepsilon$  - отношение износа (или интенсивности изнашивания) материала образца  $\Delta h_{обр}$  и эталона  $\Delta h_{эт}$  в одинаковых условиях трибологических испытаний.

$$\varepsilon = \Delta h_{обр} / \Delta h_{эт} \text{ или } \varepsilon = \Delta l_{хооб} / \Delta l_{хоэ} \quad (5-3)$$

Интенсивность линейного изнашивания или износостойкость сопряжения и его деталей (при испытаниях в регламентированном для каждого типа изделий режиме) является наиболее универсальным и комплексным показателем для объективного контроля и прогнозирования состояния узлов трения при эксплуатации.

Срок службы элемента трибосопряжения (при допущении, что за этот период  $I_h = const$ ) в общем случае можно определить по зависимости

$$t = \frac{\bar{L}}{I_h \cdot V_{ск}} \quad (5-4)$$

где  $\bar{L}$  - допустимый износ элемента;  $V_{ск}$  - скорость скольжения на поверхности трения.

Для выполнения расчёта по зависимости (5-4) необходимо задаться тремя параметрами, из которых интенсивность изнашивания можно определить экспериментальным путём или принять с использованием *метода прецедентов*, т.е. принять по аналогии из справочных данных. При этом условия нагружения материала в реальной и модельной трибосистемах должны быть максимально близки. Значения интенсивности изнашивания для некоторых трибосистем различного функционального назначения представлены в приложении.

Для определения интенсивности изнашивания материала необходимо иметь две исходные величины - износ и путь трения. Износ в лабораторной работе определяют взвешиванием образца на аналитических весах во время испытаний. Путь трения определяют расчётом.

### Модельная трибосистема "диск-колодка"

*Исходные данные:*  $a$  - длина колодки;  $d_2$  - диаметр контртела,  $n_2$  - частота вращения контртела;  $t$  - время испытаний;  $N_2$  - суммарное количество оборотов контртела за время испытаний.

Из курса геометрии имеем следующие соотношения для сектора окружности

$$a = d_2 \cdot \sin(\alpha/2) \text{ - хорда (длина колодки);}$$

$$l = 8.7 \cdot 10^{-3} \cdot d_2 \cdot \alpha \text{ - длина дуги (а - центральный угол, рад, см. рис. 5.1а).}$$

$$\text{Путь трения образца - } L_{1тр} = \pi \cdot d_2 \cdot n_2 \cdot t \quad (5-5)$$

$$\text{Путь трения образца - } L_{2тр} = L \cdot n_2 \cdot t \quad (5-6)$$

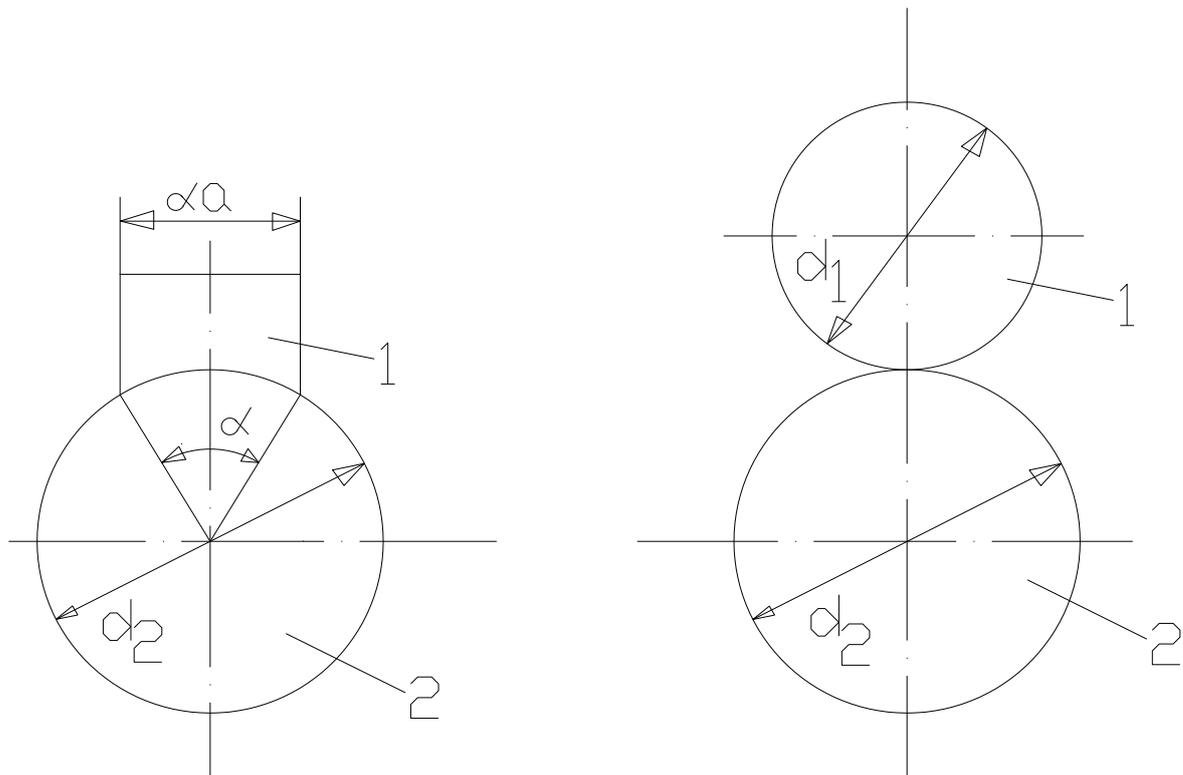


Рис. 5.1. Модельные трибосистемы  
(а - «диск-колодка», б - «диск-диск»)

### Модельная трибосистема "диск-диск"

*Исходные данные:*  $d_1, d_2$  - диаметры образца и контртела;  $n_1, n_2$  - частоты вращения образца и контртела;  $N_1, N_2$  - суммарное количество оборотов образца и контртела за время испытаний  $t$ .

$$L_{\text{тр}} = L_1 - L_2,$$

где  $L_1 = \pi \cdot d_1 \cdot N_1 = \pi \cdot d_1 \cdot n_1 \cdot t$  - путь, пройденный точкой на поверхности трения образца;

$$L_2 = \pi \cdot d_2 \cdot N_2 = \pi \cdot d_2 \cdot n_2 \cdot t \text{ - тоже для контртела}$$

$$L_{\text{тр}} = \pi \cdot t \cdot (d_1 \cdot n_1 - d_2 \cdot n_2) \quad (5-7)$$

Для получения действительного числа оборотов образца показания счётчика необходимо умножить на 100, т.к. он (счётчик) получает вращение от червячной пары с передаточным отношением 100.

Вторым фиксируемым параметром, определяющим процессы, протекающие в материалах в зоне фрикционного контакта, является момент трения  $M_{\text{тр}}$ , который регистрируется самопишущим прибором. Для определения коэффициента трения для модельной трибосистемы "диск - колодка" необходимо знать нагрузку на трибосопряжение  $F$

$$f = \frac{2 \cdot M_{\text{тр}}}{d_2 \cdot F} \quad (5-8)$$

На результат трибологических испытаний оказывает влияние большое число факторов, поэтому для данного вида испытаний особенно важно обоснованное назначение объёма требуемой выборки экспериментальных данных

$$\bar{X} - \varepsilon \leq X \leq \bar{X} + \varepsilon$$

Величина  $\varepsilon$ , характеризующая точность полученного результата, может быть определена по зависимости

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot t_{k,\alpha} \quad (5-9)$$

где  $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение случайной величины;  $n$  - количество измерений;  $t_{k,\alpha}$  - коэффициент Стьюдента, зависящий от уровня значимости  $\alpha$  и степени свободы выборки  $k$

$$\alpha = 1 - P; k = n - 1.$$

В технических расчётах наиболее часто принимают  $P = 0,95$  или  $\alpha = 0,05$

Увеличивая количество измерений (параллельных опытов)  $n$ , даже при неизменной их точности, можно увеличить надёжность доверительных оценок или сузить доверительный интервал (5-9). При требуемой доверительной вероятности  $P$  необходимое количество измерений  $n$  для достижения требуемой точности  $s$  можно определить по зависимости

$$n \geq \frac{t_{k,\alpha} \cdot \sigma^2}{\varepsilon^2} \quad (5-10)$$

Расчёт необходимого числа измерений по формуле (5-10) возможен, если известна заранее  $\sigma$ . В противном случае  $n$  можно определить, задав порядок будущей среднеквадратичной ошибки в отношении  $q = \varepsilon / \sigma$ . При испытании механических и трибологических свойств материалов следует придерживаться выполнения следующего неравенства

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon'}{\bar{X}} \cdot 100\% \leq 5\% \quad (5-11)$$

В общем случае кривая "износ-время" имеет три участка (рис. 5.2а).

I - после сборки детали сопрягаются по выступам неровностей. Площадь фактического контакта при этом мала, т.е. при нагружении пары трения действуют большие давления. В результате этого в начале работы имеет место повышенный износ трибосопряжения.

II - притирка микронеровностей контактирующих поверхностей приводит к снижению интенсивности изнашивания в связи с увеличением несущей поверхности. Процесс установившегося изнашивания заключается в деформировании, разрушении и непрерывном воссоздании на отдельных участках поверхностного слоя со стабильными свойствами. Увеличение зазоров в сочленениях ухудшает условия жидкостной смазки и может привести к повышению динамичности работы трибосопряжения.

III - изменения в макрогеометрии контактирующих поверхностей при дальнейшей работе может вызвать увеличение интенсивности изнашивания и привести к отказу трибосопряжения.

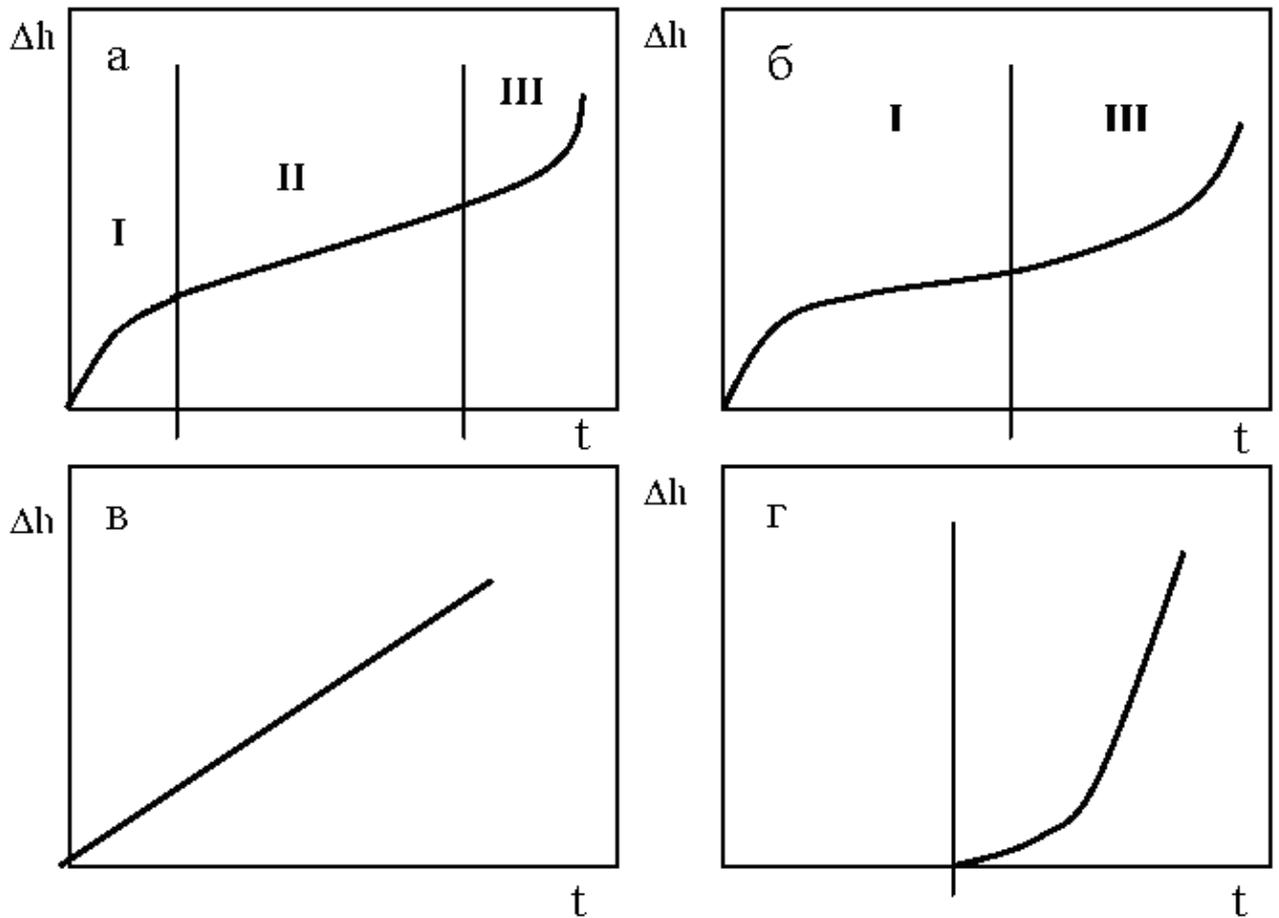


Рис. 5.2. Кривые кинетики износа

I- приработка ( $d_2\Delta h/dt < 0$ ); II – установившийся износ ( $d_2\Delta h/dt = 0$ );

III - катастрофический износ ( $d_2\Delta h/dt > 0$ )

Схема на рис. 5.2, б имеет место при неправильной конструкции трибосопряжения. Отсутствие стадий приработки и катастрофического износа (рис. 5.,2 в) характерно для работы режущего инструмента, исполнительных органов машин, работающих в условиях абразивного изнашивания (например, лезвие лемеха плуга по ширине задней фаски; цепные передачи сельскохозяйственных машин). Для работы высших кинематических пар (подшипники качения) характерно отсутствие стадий приработки и установившегося износа (рис. 5.2,г). Необходимо отметить, что тангенс угла наклона, образованного осью абсцисс и касательной к кривой в произвольной точке, определяет скорость изнашивания в данный момент времени.

В связи с тем, что исследование работы конкретного трибосопряжения на трибометре СМЦ-2 проводится с использованием модельных трибосистем при проведении испытаний необходимо стремиться к тому, чтобы удельное давление и скорость скольжения на контакте должны соответствовать реальным значениям. В этом случае значения коэффициента трения и процесс из-

нашивания должны соответствовать натурным узлам. Однако, если для работы трибосопряжения характерна повышенная температура, то её также необходимо учитывать при моделировании режима работы трибосистемы на трибометре СМЦ.

При исследовании износа образцов в лабораторной работе модельная трибосистема работает в условиях установившегося износа.

### Оборудование, инструменты и материалы:

Трибометр СМЦ-2, аналитические весы, комплект образцов для испытания в условиях скольжения и качения с проскальзыванием, мерительный инструмент.

### Порядок выполнения работы

1. Определение трибологических свойств материалов в условиях трения скольжения.
  - 1.1. Реализовать модельную трибосистему, установив контртело – «диск» и образец – «колодку» (привод образца должен быть отключён).
  - 1.2. Выбрать по указанию преподавателя условия испытания (скорость скольжения и нагрузку).
  - 1.3. Провести методические опыты. Определить время наработки, при котором масса изношенного материала в 10, 20, 30, 40 раз превышает точность, обеспечиваемую аналитическими весами.
  - 1.4. Выбрать время испытаний. Провести 5 замеров величины износа образца и момента трения.
  - 1.5. Результаты измерений занести в таблицу результатов
  - 1.6. Выполнить статистическую обработку полученной выборки, результат представить в виде  $X = \bar{X} \pm S$ .
  - 1.7. Рассчитать интенсивность изнашивания материала образца.
  - 1.8. Проанализировать полученный результат. В приложении найти трибосистемы, имеющие близкую величину интенсивности изнашивания.
2. Определение трибологических свойств материалов в условиях трения качения с проскальзыванием.
  - 2.1. Реализовать модельную трибосистему, установив контртело – «диск» и образец – «диск». Выбрать величину проскальзывания и установить соответствующие сменные шестерни привода образца.
  - 2.2. Выбрать по указанию преподавателя нагрузку.
  - 2.3. ..2.8 Выполняются по аналогии с пунктами 1.3. ... 1.8.
  - 2.9 . Оформить протокол лабораторной работы.

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АВТОФРИКЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

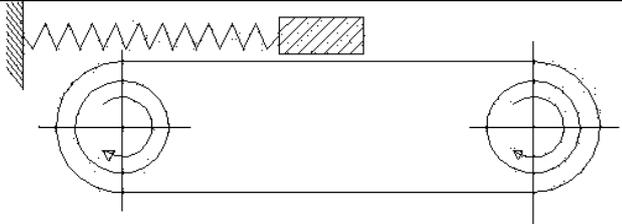
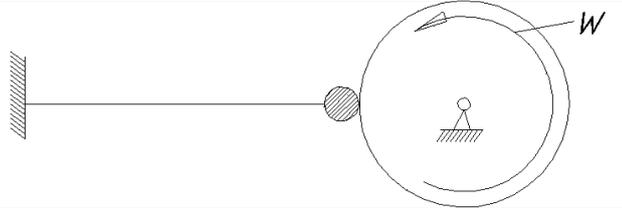
Цель работы: изучение зависимостей автофрикционных колебаний, работа с лабораторными моделями.

Автоколебаниями (или самовозбуждающимися колебаниями) называют незатухающие колебания, поддерживаемые за счет источников энергии, не обладающих колебательными свойствами. При автоколебаниях переменная сила, поддерживающая движение, управляется самим движением и при прекращении движения исчезает.

В частности, автоколебания могут возникать в системах с нелинейным сухим трением (фрикционные автоколебания, табл. 6.1); при этих автоколебаниях скорость скольжения колеблется около среднего значения  $V_0$ .

Таблица 6.1

Фрикционные колебания

№ п/п	Схема	Возможные колебания
1		Горизонтальные автоколебания упруго закрепленного груза, находящегося на движущейся бесконечной ленте
2		Вертикальные автоколебания упруго закрепленного тела, прижатого к вращающемуся диску
3		Горизонтальные автоколебания тела около режима равномерного движения

Существенным условием появления фрикционных автоколебаний служит наличие падающего участка характеристики трения, где  $\frac{dR}{dv} < 0$ .

Отличительной чертой автоколебаний является независимость их амплитуды и частоты от начальных условий. На рис. 6.1 показаны огибающие кривые  $y = y(t)$  при различных начальных условиях.

Дифференциальное уравнение возмущенного движения имеет вид

$$m\ddot{y} + \Delta R(v_0, \dot{y}) + cy = 0 \quad (6-1)$$

перемещение у отсчитывают от невозмущенного уровня, т. е. от положения равновесия схем 1 и 2 в табл. 6.1 или от движущегося со скоростью  $V_0$ , начала координат для схемы 3 табл. 6.1.

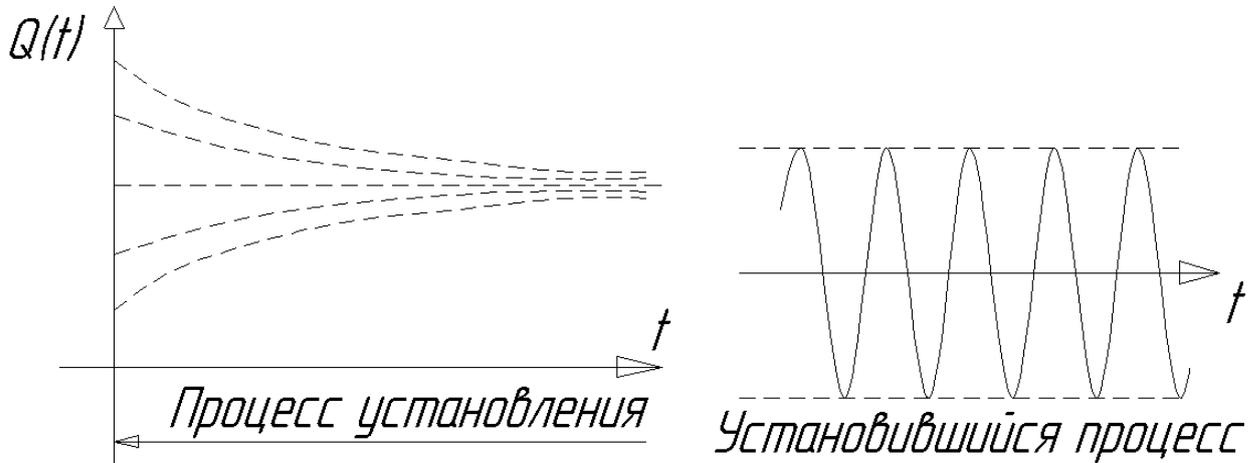


Рис. 6.1. Огибающие кривые колебаний, при различных начальных условиях

В уравнении (6-1) разность  $\Delta R(v_0, \dot{y}) = R(v_0) - R(v_0 - \dot{y})$  представляет собой приращение силы трения, возникающее из-за изменения скорости скольжения; на падающем участке характеристики эта разность отрицательна («отрицательное» демпфирование, способствующее раскачке колебаний).

Дифференциальное уравнение верхней огибающей графика движения системы с нелинейным внутренним трением.

$$\dot{a} + \frac{\alpha}{cT} a^n = 0 \quad (6-2)$$

где  $c$  – коэффициент жесткости системы;  $T$  – период колебаний (приблизительно равный периоду свободных колебаний недемпфированной системы). Решением дифференциального уравнения (6-2) при  $n \neq 1$  будет

$$a = \frac{a_0}{\sqrt[n-1]{1 + \frac{(n-1)\alpha t}{cT} a_0^{n-1}}} \quad (6-3)$$

Точное решение уравнения (6-3), как правило, затруднительно.

Для упрощения решения в зависимости от параметров системы пользуются одним из двух приближенных способов.

1. При весьма крутом падении характеристики трения и значительной жесткости упругой связи в уравнении (6-3) можно пренебречь инерционным

слагаемым, т. е. рассматривать вырожденную безмассовую систему и решать дифференциальное уравнение первого порядка

$$R(v_0) - R(v_0 - y) + cy = 0 \quad (6-4)$$

Закон автоколебания такой системы существенно отличается от гармонического, и возможны интервалы полного сцепления (отсутствия скольжения, рис. 6.2); такие автоколебания называют *разрывными* (из-за разрывов скорости), или *релаксационными*.

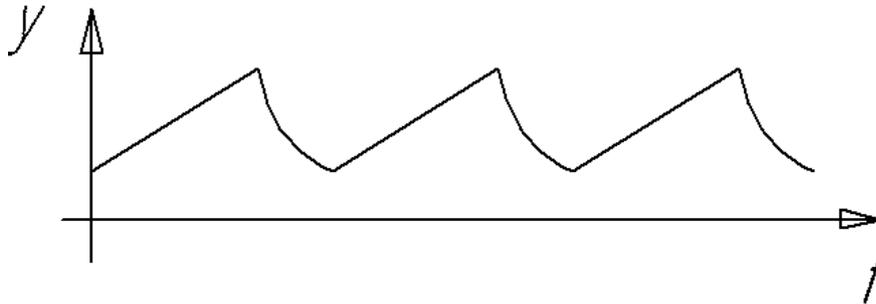


Рис. 6.2. Временной сигнал

2. При умеренно крутом падении характеристики и упругой связи небольшой жесткости принимают, что автоколебания носят гармонический характер и происходят с частотой  $p$  свободных колебаний той же системы (по без трения)

$$y = a \cdot \cos(pt) \quad (6-5)$$

В этом случае систему называют *квазилинейной*. Для определения амплитуды установившихся автоколебаний используют уравнение энергетического баланса

$$\int_0^{\frac{2\pi}{p}} \Delta R \cdot y \cdot dt = 0 \quad (6-6)$$

выражающее равенство нулю работы силы трения за один цикл колебаний.

В уравнение (6-6) вместо скорости  $\dot{y}$  следует подставить ее выражение, вытекающее из соотношения (6-5):

$$\dot{y} = -ap \cdot \sin(pt) \quad (6-7)$$

### Описание моделей

Первая модель системы с автофрикционными колебаниями представлена на рис. 6.3. Масса  $m$ , связанная пружиной с неподвижной точкой  $A$ , покоится на горизонтальной плоскости  $SS$ , которая постепенно приобретает постоянную скорость  $v_0$  в показанном направлении. Пренебрегая начальным возмущением, мы можем предположить, что масса  $m$  будет

находиться в положении равновесия под действием силы трения  $F$  и равной противоположно направленной силы натяжения пружины. Однако опыт показывает, что равновесие в этом положении не устойчиво и возникают горизонтальные колебания массы.

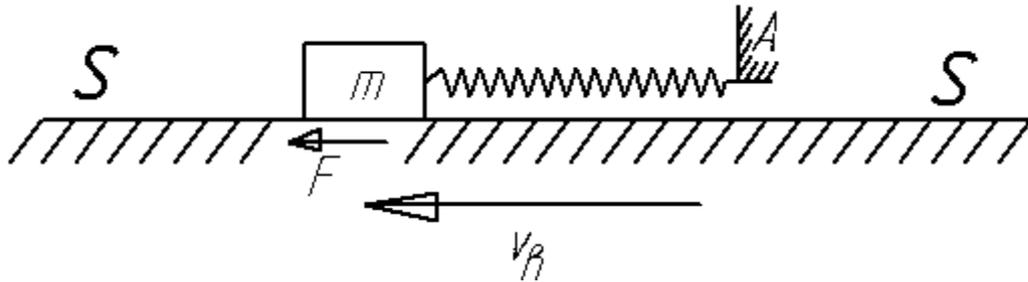


Рис. 6.3 Первая модель

Для объяснения этих колебаний нужно учесть, что сила сухого трения не постоянна и несколько падает с увеличением скорости скольжения. Если вследствие малого возмущения возникнут колебания массы, то сила трения  $F$ , всегда имеющая направление  $v_0$ , не останется постоянной и будет больше, когда масса движется в направлении  $v_0$ , чем когда она движется в противоположном направлении. Замечай, что в первом случае сила  $F$  совершает положительную работу, а во втором случае - отрицательную работу, заключаем, что за весь цикл колебания будет совершена некоторая положительная работа. Таким образом, энергия массы  $m$  нарастает, и амплитуда ее колебания будет увеличиваться. Это явление называется автоколебаниями потому, что дополнительная сила, накладываемая на постоянное среднее трение, вызывается движением массы и исчезает, если масса покоится.

Вторая модель системы, представлена на рис. 6.4. Здесь в вертикальной плоскости имеется два круглых диска с неглубокими канавками на ободах, в которых удерживается стержень  $AB$  весом  $W$ .

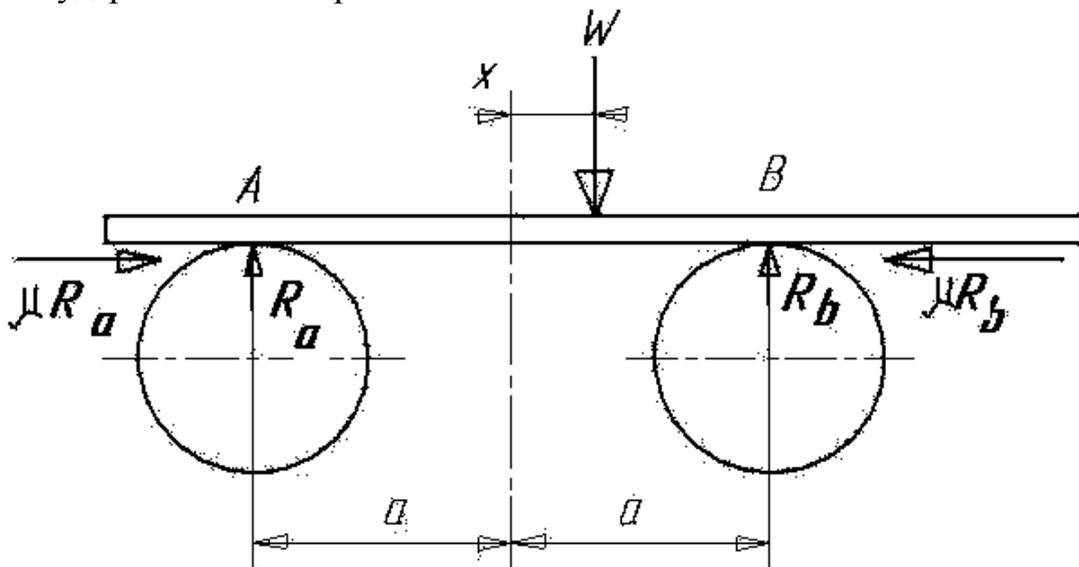


Рис. 6.4 Вторая модель автофрикционных колебаний

Расстояние между осями дисков равно  $2a$ , и диски вращаются в противоположных направлениях с равными угловыми скоростями. Примем теперь постоянный коэффициент сухого трения равным  $\mu$  в каждой точке соприкосновения и положим, что стержень смещен от среднего положения на расстояние  $x$ . Тогда реакции в точках  $A$  и  $B$  составляют:

$$\begin{aligned} R_a &= W(a-x)/2a \\ R_b &= W(a+x)/2a \end{aligned} \quad (6-8)$$

и соответствующие силы трения равны  $\mu R_a$  и  $\mu R_b$ . Равнодействующая горизонтальных сил, действующих на стержень, равна

$$X = \mu(R_a - R_b) = -\frac{\mu Wx}{a} \quad (6-9)$$

уравнение движения стержня принимает форму

$$\frac{W}{g} \ddot{x} = -\frac{\mu Wx}{a} \quad (6-10)$$

и приводится к виду

$$\ddot{x} + \frac{\mu g}{a} x = 0 \quad (6-11)$$

Отсюда заключаем, что смещенный из своего среднего положения  $\varphi = 0$  стержень будет совершать простое гармоническое движение с периодом

$$\tau = \frac{2\pi}{p} = 2\pi \sqrt{\frac{a}{\mu g}} \quad (6-12)$$

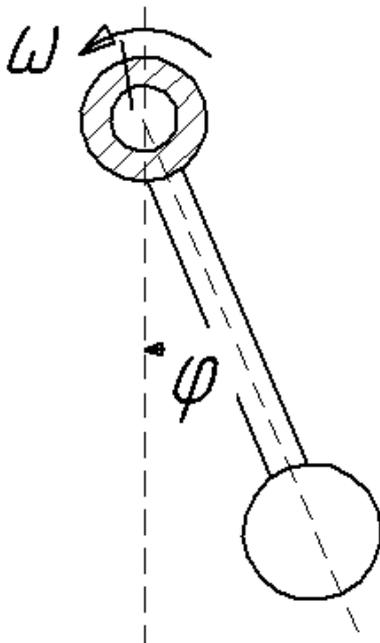


Рис. 6.5  
Маятник Фроуда

До сих пор мы считали коэффициент трения независимым от скорости скольжения. Теперь учтем, что в действительности с увеличением скорости скольжения коэффициент трения уменьшается, а с убыванием скорости скольжения возрастает. Замечая, что диск, вращающийся в сторону, противоположную движению стержня, имеет большую относительную скорость скольжения и соответственно меньший коэффициент трения, чем другой диск, заключаем, что на среднее постоянное трение, вызывающее простое гармоническое движение, представленное уравнением (6-11), накладывается вторичная дополнительная сила, действующая все время в направлении движения. Эта сила совершает положительную работу, и амплитуда колебаний будет постепенно возрастать, так что возникает явление самовозбуждающихся колебаний. Это легко увидеть на опыте; действительно, такое устройство может быть использовано для изучения закона

изменения трения в зависимости от относительной скорости скольжения путем нескольких прогонов дисков с различными угловыми скоростями и регистрации соответствующих периодов колебаний стержня. Коэффициент трения  $\mu$  для каждого прогона можно затем вычислить из выражения (6-12).

Один из первых экспериментов над самовозбуждающимися механическими колебаниями был произведен Фроудом, который обнаружил, что при вращении вала колебания качающегося на валу маятника (рис. 6.5) могут поддерживаться или даже возрастать. Причиной этого явления также служит сухое трение, действующее на маятник. Если направление вращения вала такое, как показано на рисунке, то силы трения больше, когда маятник движется вправо, чем при обратном движении. Следовательно, во время каждого цикла силы трения совершают положительную работу. Ясно, что устройства, показанные на рис. 6.4 и 6.5, обнаружат самовозбуждающиеся колебания, лишь поскольку имеется сухое трение. В случае вязкого трения сила трения возрастает со скоростью и вместо возбуждения колебаний она будет постепенно их гасить. Существуют случаи, в которых самовозбуждающиеся колебания имеют практическую важность и должны учитываться инженерами.

Требуется проверить теоретические закономерности на существующих моделях. Порядок проведения:

1. Изучение лабораторных моделей.
2. Задание граничных условий в моделях и параметров эксперимента.
3. Снятие зависимости перемещения от времени и анализ периода колебаний, частоты колебаний.
4. Изменение параметров эксперимента и проведение его повторно, снятие временных характеристик.
5. Сравнение результатов и оформление отчета с выводами.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА ТРИБОМЕТРЕ СМЦ-2

Цель работы: экспериментальное определение величины износа при испытаниях пар трения по схемам кольцо - вкладыш (трение скольжения) и ролик по ролику (трение качения). Расчет основных параметров изнашивания и построение графиков износа.

Испытания на изнашивания проводятся на специальных машинах, одной из них является машина СМЦ-2, схема которой показана на рис.. 7.1

Привод вращения образца 8 и контртела 9 осуществляется от электродвигателя 1 посредством клиноременной передачи 2 и шестерен 3. Клиноременная передача со сменными шкивами, позволяет проводить испытания при малых нагрузках на образец.

В каретке 5, поворачивающейся вокруг оси вала 4, расположены сменные шестерни 6, работающие в масляной ванне, для привода образца 8. Передаточное отношение этих шестерен определяет степень проскальзывания образца и контртела при испытаниях на трение качения с проскальзыванием.

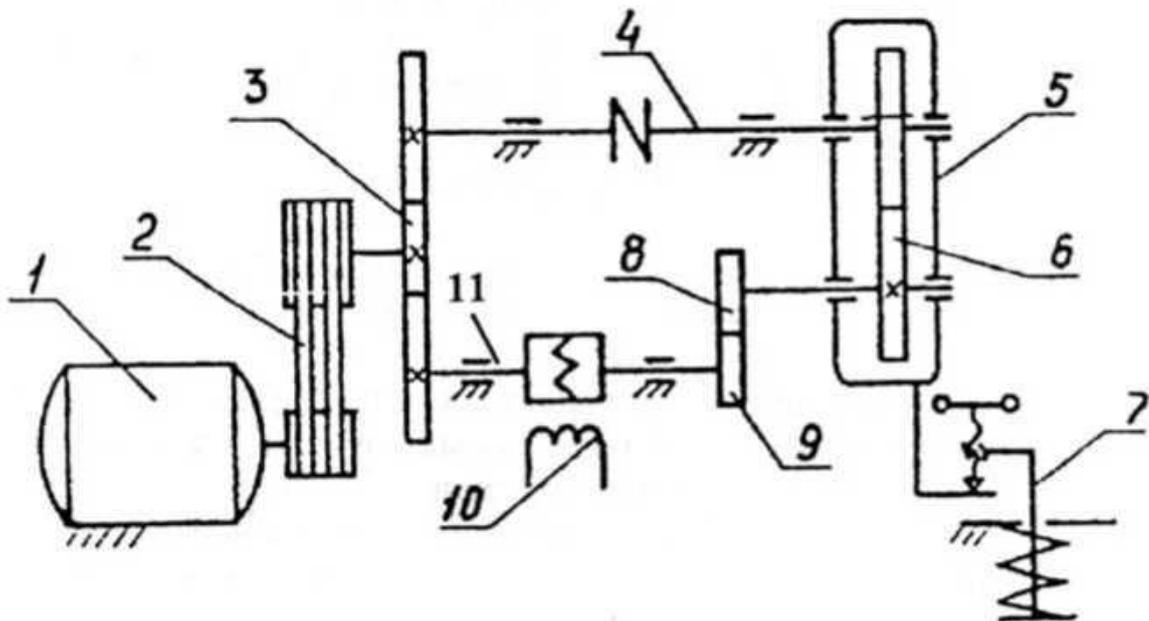


Рис. 7.1. Кинематическая схема трибометра СМЦ-2

1 - электродвигатель, 2 - клиноременная передача со сменными шкивами, 3 - шестерни привода образца и контртела, 4 - промежуточный вал, 5 - каретка, 6 - сменные шестерни привода образца, 7 - нагружающее устройство, 8 - образец, 9 - контртело, 10 - индукционный датчик момента трения, 11- торсион

Для проведения исследований работоспособности трибосистемы в жидких средах трибометр оснащен специальной камерой.

Момент трения измеряется бесконтактным индуктивным датчиком 10 по скручиванию торсионного вала 11, на котором закреплено контртело 9. Регистрацию момента трения производят самопишущим потенциометром типа КСП-2.

Каретка консольно крепится в бабе нижнего образца. Каретка может быть снята с машины для установки и работы с камерой для образцов "вал-штулка". Более подробную информацию смотрите в лабораторной работе №4.

В качестве испытываемых образцов используются диски (рис. 7.2).

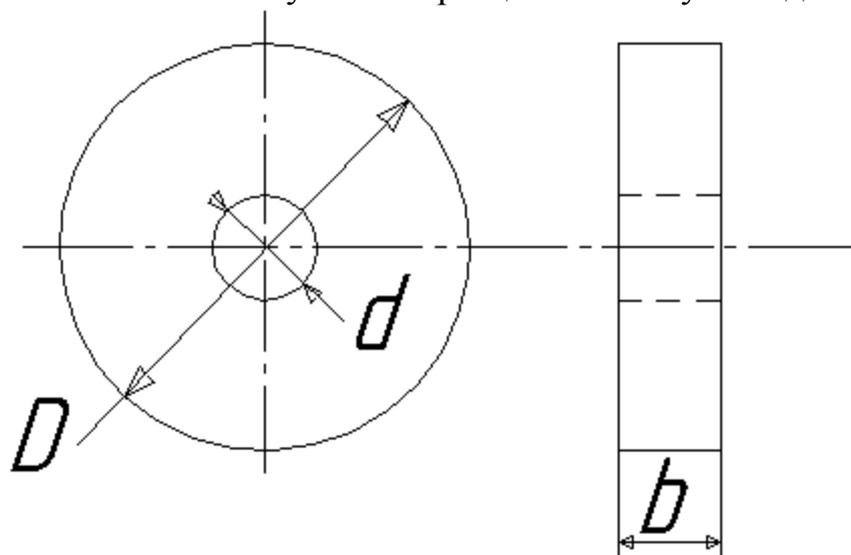


Рис. 7.2. Образец для испытания.

Наружный диаметр образца  $\varnothing=40$  мм, внутренний диаметр (посадочное отверстие)  $d=16$  мм, ширина  $B=10$  мм. Биение наружной поверхности относительно оси и торцевое биение должно не превышать 0,01 мм.

Основные схемы испытаний на изнашивание на машине СМЦ-2 показаны на рис. 7.3. Подробнее см. лабораторные работы 4 и 5.

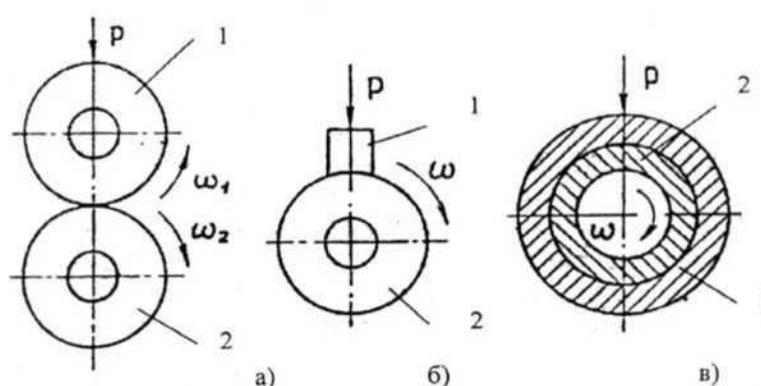


Рис. 7.3. Схемы испытаний на изнашивание

Величина износа по массе определяется путем взвешивания образцов на аналитических весах с точностью до 1 мг, а, линейный износ, - путем измерения диаметра образца микрометром с точностью до 1 мкм, через определенное число циклов испытаний, например, через  $10^5$  циклов. Предваритель-

но, образцы очищаются от смазки, обезжириваются и охлаждаются до комнатной температуры. Это необходимо для обеспечения точности измерений.

Линейный износ и износ по массе рассчитываются по формулам:

$$h = \frac{D_i - D_{i+1}}{2} \quad (7-1)$$

$$g = G_i - G_{i+1} \quad (7-2)$$

где  $D$  и  $G$  - диаметр и масса образца, соответственно;  
 $i$  - точка измерений.  $G_i$

### Обработка результатов экспериментов

Результаты взвешиваний и измерений диаметра образца через каждые 105 циклов изнашивания заносятся в протокол испытаний и на их основании рассчитывается линейный износ и износ по массе.

Таблица 7.1

Результаты испытаний

Число циклов $N_t, 10^5$	Износ по массе				Линейный износ			
	$G_i, \text{мг}$	$G_{i+1}, \text{мг}$	$g_i, \text{мг}$	$\sum g_i, \text{мг}$	$D_i, \text{мм}$	$D_{i+1}, \text{мм}$	$h, \text{мкм}$	$\sum h, \text{мкм}$
0								
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

На основании данных таблицы строятся графики зависимостей  $\sum g_i = f(N_c)$  и  $\sum h = f(N_c)$ , по которым устанавливается область установившегося износа (линейные участки кривых). Для данной области определяются интенсивности линейного изнашивания:

$$I_h = h / S \quad (7-3)$$

интенсивность изнашивания по массе:

$$I_G = G / S \quad (7-4)$$

энергетическая интенсивность изнашивания:

$$I_w = V / W \quad (7-5)$$

скорость изнашивания

$$I_{h(t)} = h / t \quad (7-6)$$

В формулах (7-3 – 7-6)  $h, V$  и  $G$  - величины, соответственно, линейного, объемного и массового износа;  $s$  - путь трения;  $w = F_f \cdot s$  - работа сил трения;  $t$  - время изнашивания;  $v$  - скорость относительного перемещения поверхностей пары трения.

При этом, для определения работы трения по формуле 7-6 необходимо определить путь трения  $s = \pi \cdot D \cdot N_c$ , где  $D$  - номинальный диаметр образца и силу трения -  $F_f = F_N \cdot f$ , где  $F_N$  - нормальная сила,  $f$  - коэффициент трения (для данных условий испытаний может быть принят 0,1-0,15 для трения скольжения и 0,02 для трения качения). Время изнашивания  $t = \frac{N_c}{n}$ , где  $n$  - частота вращения образца. Средняя величина линейного износа за один цикл испытания определяется по формуле 7-7.

$$h_c = \frac{h}{N_c} \quad (7-7)$$

Для этого необходимо по графику определить число циклов и суммарный линейный износ в области установившегося изнашивания.

## ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ СМАЗКИ И КЛАССИФИКАЦИИ СМАЗКИ

При работе различных узлов и механизмов происходит взаимное перемещение соприкасающихся поверхностей деталей, при котором возникает трение. В результате трения детали изнашиваются. Поскольку сила трения направлена по касательной к поверхности трущихся деталей в сторону, противоположную движению, то она является вредной. От силы трения, на преодоление которой затрачивается энергия, будет зависеть коэффициент полезного действия механизма, а от характера трения – износ поверхностей и срок службы механизма. Но, надо отметить что, трение может быть полезным в том случае, когда оно применяется для передачи усилий (фрикционные передачи, тормозные системы и др.).

В зависимости от характера относительного перемещения деталей различают трение скольжения (трение первого рода) и трение качения (трение второго рода). Существует также статическое трение – сила, препятствующая началу движения, и динамическое трение – сила, возникающая при движении поверхностей.

Исходный продукт любого смазочного материала – базовое масло. При подборе базового масла определяются степень очистки, вязкость, температура, совместимость с другими компонентами и возможными конструктивными материалами, его стоимость.

Для повышения надежности и стабильности работы смазочных материалов применяют присадки следующего назначения: противозадирные и противоизносные, противопенные, антиокислительные, вязкостные, антифрикционные, противокоррозионные, депрессорные и другие. Содержание присадок в таких маслах может составлять в процентах от десятых долей до 10 %.

### **СПОСОБЫ СМАЗКИ И СМАЗОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА**

Существует два различных способа смазки:

индивидуальный (рис. 8.1);

централизованный(рис. 8.2).

Оба способа могут иметь периодическую или непрерывную подачу смазки. Во всех случаях масло подается либо без принудительного давления - самотеком, либо с принудительным давлением - с помощью различных насосов. Периодическая подача масла под давлением может осуществляться плунжерным насосом ручного действия, непрерывная - с помощью приводного плунжерного насоса.

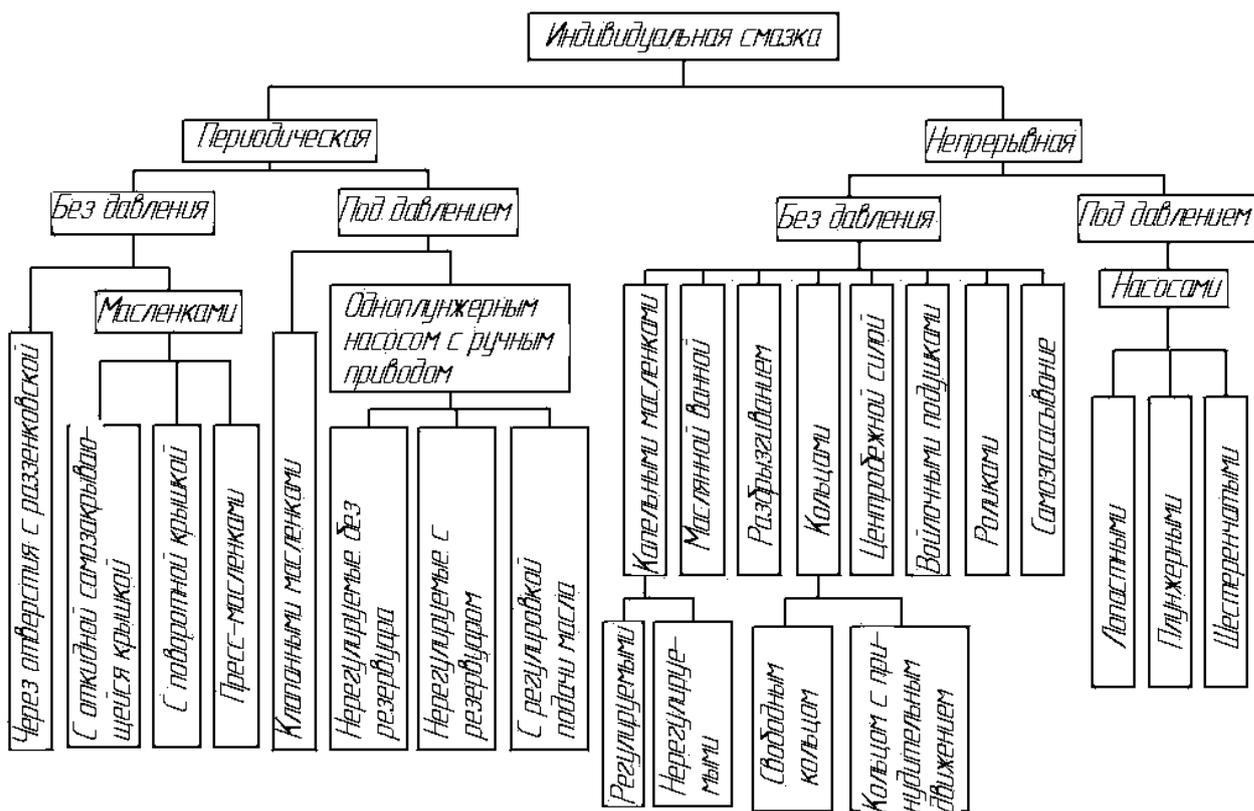


Рис. 8.1. Схема индивидуальной смазки

Централизованная непрерывная смазка с подачей масла под давлением, когда масло одновременно подаётся во многие (или даже во все) места смазки, наиболее предпочтительна. Такой вид смазки находит применение современных деревообрабатывающих машинах.

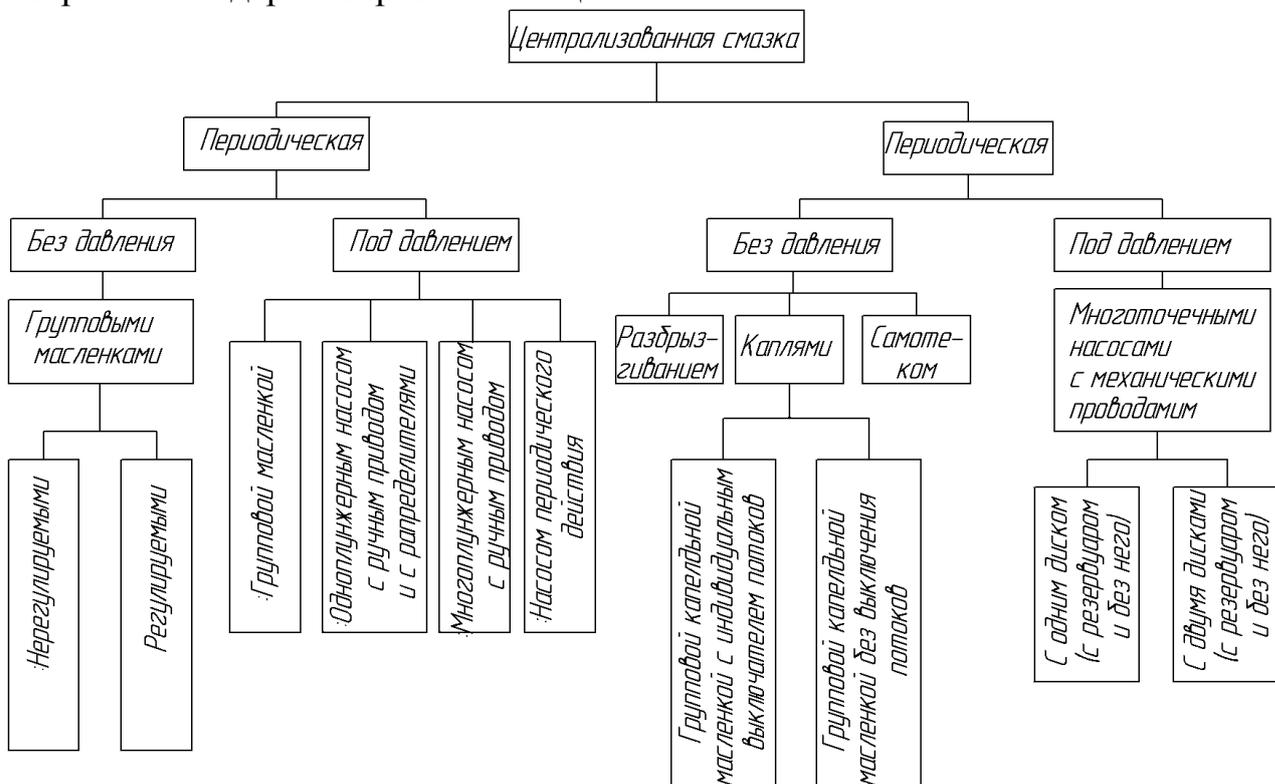


Рис. 8.2 Схема централизованной смазки

Карта смазки - основной документ, регламентирующий периодичность и количество смазки механизмов станков, способы смазки и применяемые при этом смазочные устройства. Карта смазки находится в паспорте станка и является неотъемлемой частью инструкции по эксплуатации. Смазка узлов осуществляется маслами с периодичностью, указанной в карте смазки. Однако в зависимости от интенсивности и условий эксплуатации, состояния окружающей среды (запыленности, температуры и т. д.) сроки смазки могут быть изменены. Периодичность смазки в этом случае должна быть узаконена распоряжением главного инженера предприятия.

*Смазочные материалы хранят* в специальном отапливаемом помещении - маслохранилище. Все поступающие смазочные материалы должны иметь сертификат и паспорт. Их качество систематически проверяют. Смазочные материалы хранят в отдельных для каждого вида масел металлических емкостях. На каждой емкости должно быть указано название смазки. Маслохранилище должно быть оборудовано средствами подогрева масла и иметь комплект мелкой чистой тары, приспособлений и заправочного инструмента. Электроосвещение должно быть во взрывобезопасном исполнении.

*Номенклатуру и количество* хранимого масла определяют по нормам и картам смазки оборудования, находящегося в эксплуатации на предприятии.

### Виды смазочных материалов и их классификация

Смазочные материалы классифицируются на группы в зависимости от следующих признаков: происхождение или исходное сырье для получения; внешнее состояние; назначение.

По происхождению или исходному сырью различают такие смазочные материалы:

- минеральные, или нефтяные, являются основной группой выпускаемых смазочных масел (более 90 %). Их получают при соответствующей переработке нефти. По способу получения такие материалы классифицируются на дистиллятные, остаточные, компаундированные или смешанные;

- растительные и животные, имеющие органическое происхождение. Растительные масла получают путем переработки семян определенных растений. Наиболее широко в технике применяются касторовое масло;

- животные масла вырабатывают из животных жиров (баранье и говяжье сало, технический рыбий жир, костное и спермацетовые масла и др.);

- органические, масла по сравнению с нефтяными обладают более высокими смазывающими свойствами и более низкой термической устойчивостью. В связи с этим их чаще используют в смеси с нефтяными;

- синтетические, получаемые из различного исходного сырья многими методами (каталитическая полимеризация жидких или газообразных углеводородов нефтяного и нефтяного сырья; синтез кремнийорганических соединений – полисиликонов; получение фтороуглеродных масел). Синтетические масла обладают всеми необходимыми свойствами, однако из-за вы-

сокой стоимости их производства применяются только в самых ответственных узлах трения.

По внешнему состоянию смазочные материалы делятся на:

- жидкие смазочные масла, которые в обычных условиях являются жидкостями, обладающими текучестью (нефтяные и растительные масла);

- пластичные, или консистентные, смазки, которые в обычных условиях находятся в мазеобразном состоянии (технический вазелин, солидолы, констатины, жиры и др.). Они подразделяются на антифрикционные, консервационные, уплотнительные и др.;

- твердые смазочные материалы, которые не изменяют своего состояния под действием температуры, давления и т. п. (графит, слюда, тальк и др.). Их обычно применяют в смеси с жидкими или пластичными смазочными материалами.

По назначению смазочные материалы делятся на масла:

- моторные, предназначенные для двигателей внутреннего сгорания (бензиновых, дизельных, авиационных);

- трансмиссионные, применяемые в трансмиссиях тракторов, автомобилей, комбайнов, самоходных и других машин;

- промышленные, предназначенные главным образом для станков;

- гидравлические для гидравлических систем различных машин;

- компрессорные, приборные, цилиндрические, электроизоляционные, вакуумные и др.

Лабораторная работа № 9

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПОДШИПНИКОВ

Цель работы: Ознакомиться с классификацией, конструкцией и условными обозначениями, отличительными признаками подшипников качения (ПК). Определить возможные направления воспринимаемых нагрузок различными типами подшипников.

Классификация подшипников

ПК классифицируют по следующим основным признакам: направлению воспринимаемых нагрузок, форме тел качения, числу рядов тел качения и основным конструктивным особенностям.

По направлению воспринимаемой нагрузки ПК разделяют на четыре группы, которые представлены в табл. 9.1

Таблица 9.1

Направление воспринимаемой нагрузки

Тип подшипников	Особенности использования
радиальные	только для радиальной нагрузки (роликподшипники с цилиндрическими роликами, однорядные шарикоподшипники с канавкой для ввода шариков) или для радиальной и ограниченной осевой нагрузки (шарикоподшипники однорядные, шарико- и роликподшипники двухрядные сферические)
радиально-упорные	для восприятия комбинированных, т.е. радиальных и осевых нагрузок
упорно-радиальные	для восприятия большой осевой и небольшой радиальной нагрузок
упорные	для восприятия только осевых нагрузок

По форме тел качения ПК делятся на роликовые и шариковые.

Роликовые подшипники выполняют:

- а) с короткими цилиндрическими роликами;
- б) с коническими роликами;
- в) с игольчатыми роликами;
- г) со сферическими или сфероконическими роликами.

По числу рядов тел качения подшипники подразделяются на одно-, двух-, четырех- и многорядные.

К основным конструктивным особенностям подшипников качения относятся: наличие защитных шайб; конусное отверстие внутреннего кольца подшипника, сдвоенные подшипники и др.

Система условных обозначений

На торце одного из колец ПК нанесены его условное обозначение и номер завода-изготовителя. Условное обозначение подшипника составляется из цифр (максимальное количество цифр 7) и характеризует внутренний диаметр ПК, его серию, тип, конструктивную разновидность. Порядок отсчета цифр справа налево (рис. 9.1).

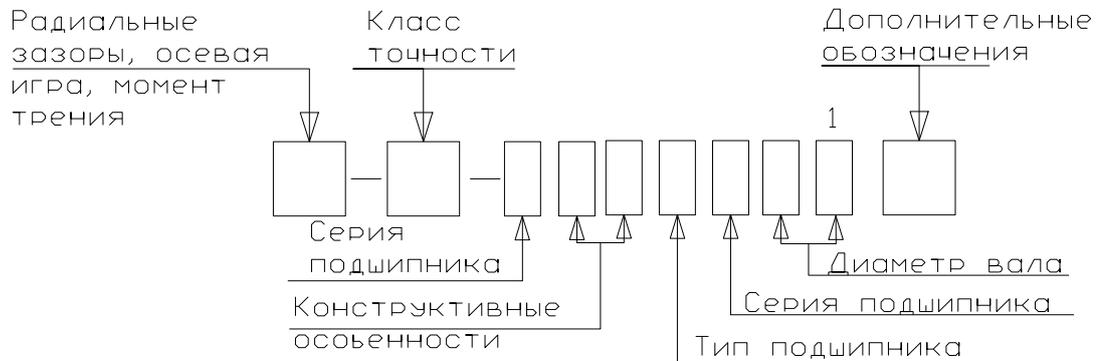


Рис. 9.1 Пример условного обозначения подшипников качения

Две первые цифры обозначают внутренний диаметр ПК. Для подшипников с внутренним диаметром от 20 до 495 мм эти цифры соответствуют внутреннему диаметру в миллиметрах, деленному на 5.

Третья цифра, обозначающая серию диаметров, совместно с седьмой цифрой, обозначающей серию ширины, определяет размерную серию подшипника (табл. 9.1). Исключением являются цифры 5 и 6 на третьем месте, характеризующие серию по диаметру и ширине.

Таблица 9.1

Обозначение серии подшипников

Характеристика по диаметру		Особо легкая				Легкая				Средняя				Тяжелая				
		Узкая	Нормальная	Широкая	Особо широкая	Особо узкая	Узкая	Нормальная	Широкая	Особо широкая	Особо узкая	Узкая	Нормальная	Широкая	Особо широкая	Узкая	Широкая	
Обозначения	3 место	1	1	1	1	2	2	2	5	2	2	3	3	3	6	3	4	4
	7 место	7	0	2	3	4	8	0	1	8	3	4	8	0	1	0	3	0

Четвертая цифра обозначает тип ПК, который обозначен в табл. 9.2

Пятая или пятая с шестой цифрой обозначают конструктивную разновидность ПК (номинальный угол контакта тел качения с наружным кольцом подшипника в радиально-упорных подшипниках и др.).

Кроме цифр основного обозначения, слева и справа от него могут маркироваться дополнительные знаки (буквенные или цифровые). Так, например, класс точности ПК маркируется цифрой слева через тире от основного обозначения.

Обозначения классов точности в порядке возрастания точности: 0, 6, 5, 4, 2. Класс точности подшипника "0" не маркируется, если слева не стоит цифра, характеризующая величину радиального зазора или осевой игры.

Таблице 9.2

Условное обозначение подшипников

Уловное обозначение	Тип подшипник
0	шариковый радиальный однорядный
1	шариковый радиальный сферический
2	роликовый радиальный с короткими цилиндрическими роликами
3	роликовый радиальный сферический
4	роликовый радиальный с длинными цилиндрическими или игольчатыми роликами
5	роликовый радиальный с витыми роликами
6	шариковый радиально-упорный
7	роликовый конический
8	шариковый упорный и шариковый упорно-радиальный
9	роликовый упорный и роликовый упорно-радиальный

Величина радиального зазора и осевой игры ПК обозначается номером соответствующего дополнительного ряда и проставляется перед классом точности подшипника. ПК с радиальным зазором по основному ряду дополнительные условные обозначения не присваиваются. (Подробнее см. ГОСТ 3189-89).

Дополнительные обозначения справа от основного обозначения характеризуют изменение металла или конструкции деталей и специальные технические требования, предъявленные к подшипникам (табл. 9.2). Цифры 1, 2, 3 и т.д. справа от дополнительных знаков Б, Г, Д, Е, К, Л, Р, У, Х, Щ, Э, Ю, Я обозначают каждое последующее исполнение с каким-то отличием от предыдущего.

Таблица 9.2

Условные обозначения

Дополнительные условные обозначения подшипников	Отличительные признаки подшипников
1	2
	Сепаратор
Б	из безоловянной бронзы
Г	массивный из черных металлов
Д	из алюминиевых сплавов
Е	из пластических материалов
Л	из латуни
К	Конструктивные изменения деталей. Железный штампованный сепаратор для подшипников с короткими цилиндрическими роликами.

1	2
Р	Детали из теплостойкой стали.
С1, С2, С3, С4,	Подшипники шариковые радиальные однорядные с двумя защитными шайбами типа 80000, заполненные специальной смазкой, обозначенной цифрой при букве С
	Специальные требования:
Ш	Детали: из цементируемой стали
Х	из стали со специальными присадками (ванадий, кобальт и др.)
Ю	из коррозионно-стойкой стали
Я	из редко применяемых материалов (пластмассы, стекла, керамики и т.д.)

В табл. 9.2 представлена классификация и примеры обозначения подшипников качения

Таблица 9.2

Классификация подшипников

Классификация подшипников				Пример обозначения
Подшипники качения	Радиальные	Шариковые	Однорядные	00000, 50000, 60000, 80000, 160000, 180000
			Двухрядные	1000, 11000
		Роликовые	С короткими цилиндрическими роликами	2000, 12000, 32000, 42000, 52000, 62000, 92000
			Двухрядные сферические	53000, 153000
			С длинными цилиндрическими роликами или иглами	74000
			С винтовыми роликами	5000
	Радиально-упорные	Шариковые	Однорядные	6000, 36000, 46000, 66000
			Сдвоенные	236000, 336000, 246000, 346000, 446000, 266000, 366000, 466000
		Роликовые	Однорядные	7000, 27000, 67000
			Двухрядные	77000
			Четырехрядные	97000
		Упорные	Шариковые	Одинарные
	Двойные			38000
	Роликовые		С цилиндрическими роликами	9000
			С коническими роликами	19000
			Со сферическими роликами	39000

Область применения подшипников

По номограммам на рис. 9.3 и 9.4 находим пересечение трех характеристик:  $P$  (Н),  $n$  (мин-1) и  $n$  (с-1). Оно указывает, что рассматриваемый случай относится к области применения подшипников скольжения.

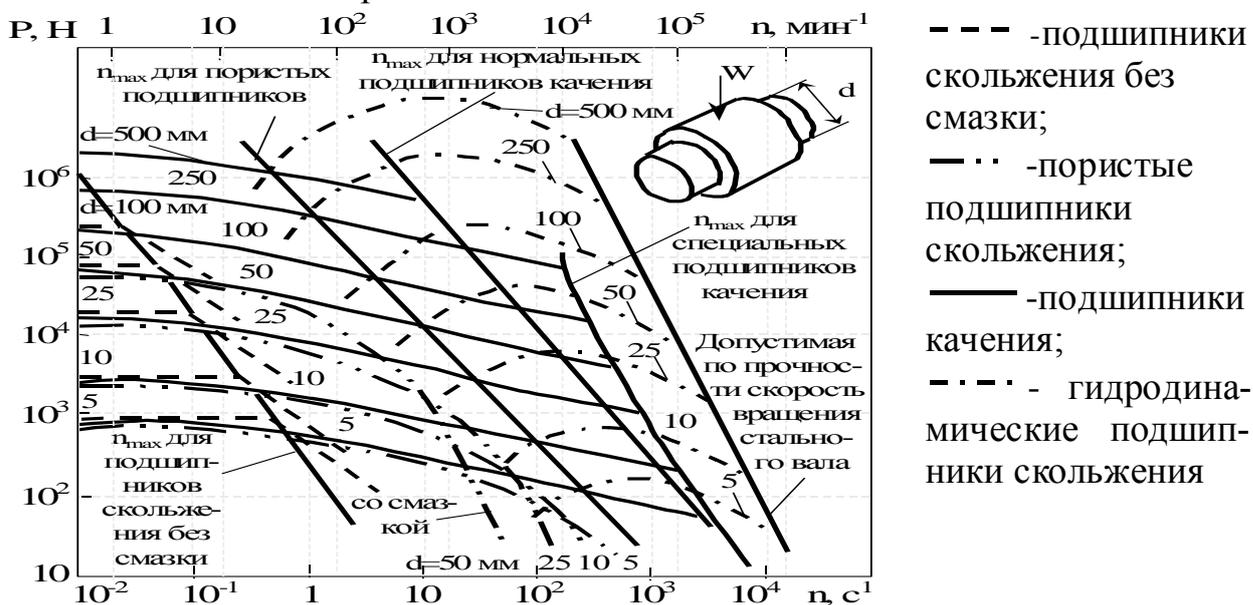


Рис. 9.3. Области применения различных типов радиальных подшипников

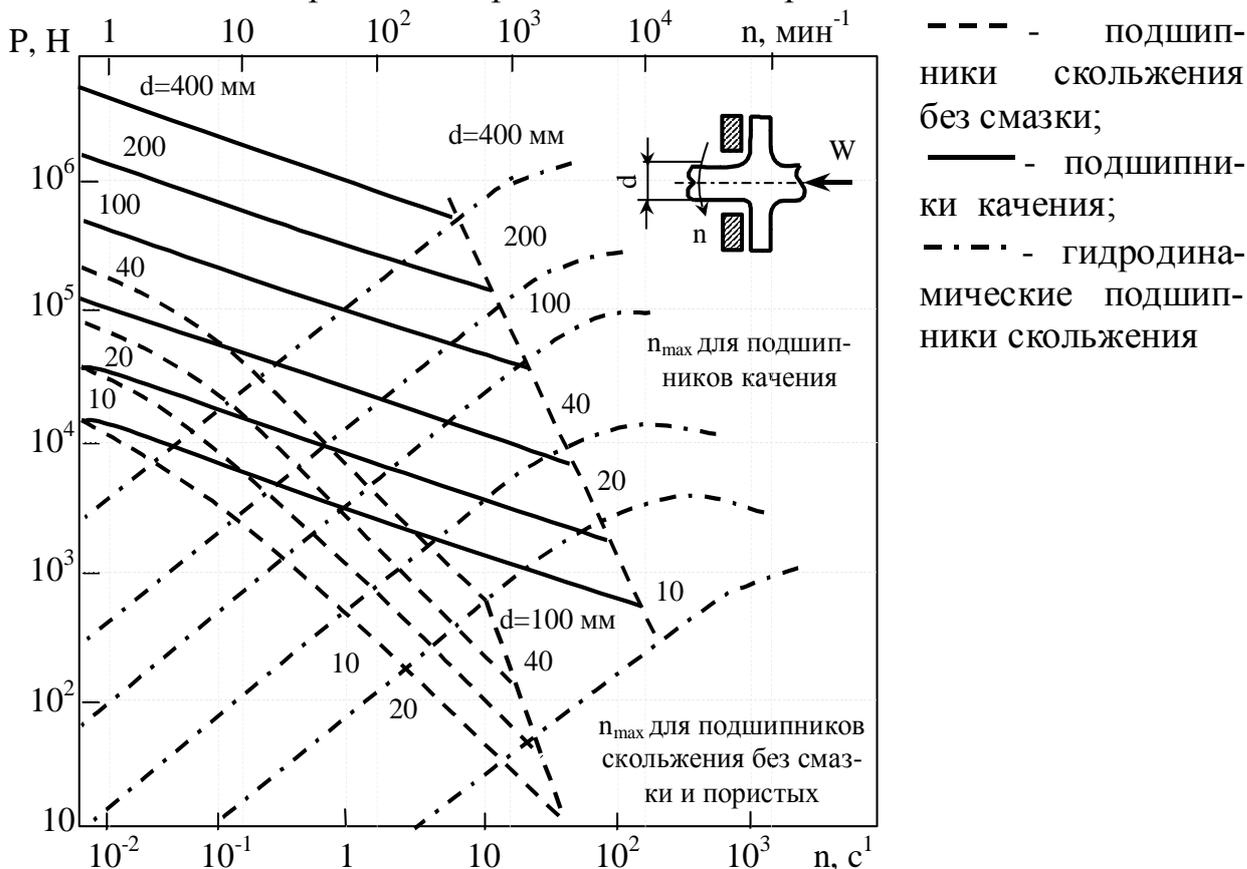


Рис. 9.4. Области применения различных типов упорных подшипников

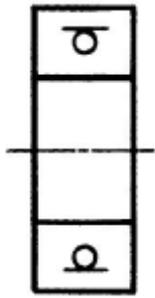
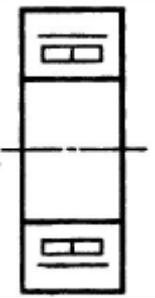
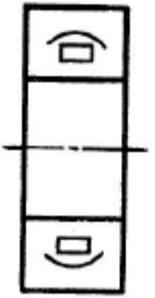
При окончательном выборе типа подшипников тщательно изучают прототипы проектируемых узлов трения, опыт их эксплуатации и особенности конструкции. После выбора базовой схемы ее дорабатывают по условиям технического задания.

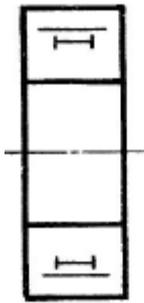
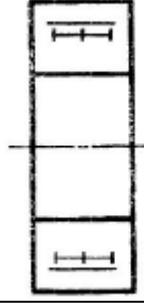
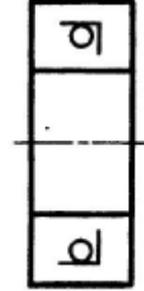
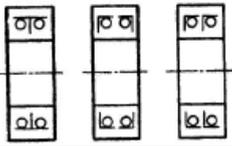
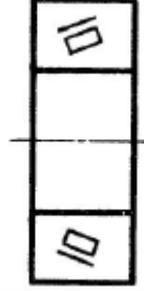
В целом конструкторы придерживаются ряда общих правил отработки узлов трения. Так, одним из общих правил проектирования узлов трения-скольжения является правило выбора материалов пары и структуры. Оно содержит, в свою очередь, правило выбора твердости и правило различия структуры.

### Условное обозначение

При необходимости указания на сборочном чертеже типа подшипника в контур подшипника вписываются условное графическое обозначение. Примеры упрощенных изображений подшипников (ГОСТ 2.420-69) без указания конструктивных особенностей приведены в таблице 9.3.

Таблица 9.3

Классификация подшипников				Пример обозначения
1				2
Подшипники качения	Радиальные	Шариковые	Однорядные	
		Роликовые	С короткими цилиндрическими роликами	
			Двухрядные сферические	

			1	2
Подшипники качения		Радиальный игольчатый	Однорядный	
			Двухрядный	
	Радиально-упорные	Шариковые	Однорядные	
			Сдвоенные	
		Роликовые	Однорядные	
	Двухрядные			

			1	2
Подшипники качения	Упорные		Четырехрядные	
		Шариковые	Одинарные	
			Двойные	
		Роликовые	С цилиндрическими роликами	
			Игольчатый	

Интенсивность изнашивания элементов трибосопряжений различного функционального назначения

Структура ТМС	Интенсивность изнашивания $I_p$
Шток поршня ДВС	$(1.7...5.7) \cdot 10^{-13}$
Цилиндр ДВС	$(6.3...7.7) \cdot 10^{-13}$
Цилиндр локомотива	$(1.7...2.2) \cdot 10^{-12}$
Цилиндр двигателя пылевидного топлива	$1.1 \cdot 10^{-11} \dots 2.8 \cdot 10^{-9}$
Гильза цилиндра из серого чугуна (поршневое кольцо - серый чугун, $v_{сж}=7...20$ м/с; жидкая смазка - масло М10Г1)	$10^{-11}$
Поршневые кольца ДВС	$(1.1...54.6) \cdot 10^{-12}$
Поршневые кольца локомотива острого пара	$(2.7...22) \cdot 10^{-11}$
Поршневое кольцо из серого чугуна (гильза цилиндра - серый чугун, $v_{сж}=7...20$ м/с; жидкая смазка - масло М10Г1)	$10^{-12} \dots 10^{-11}$
Поршневое кольцо из графита (гильза цилиндра - серый чугун; влажная двуокись углерода $q=0.4$ МПа, $v_{сж}=3$ м/с)	$5 \cdot 10^{-11}$
Поршневое кольцо из графита (гильза цилиндра - серый чугун; влажная двуокись углерода $q=8$ МПа, $v_{сж}=1.2$ м/с)	$5 \cdot 10^{-10}$
Коллекторы машин постоянного тока	$(2.4...7.4) \cdot 10^{-13}$
Угольные щётки электрических машин	$(1.9...3.2) \cdot 10^{-10}$
Недопустимое значение для угольной щётки	$(1...1.4) \cdot 10^{-9}$
Коренной и шатунный подшипники ДВС	$(1.1...1.4) \cdot 10^{-12}$
Подшипники железнодорожных осей	$(3.9...5.3) \cdot 10^{-12}$
Опорный подшипник вращающейся печи	$(1.0...2.1) \cdot 10^{-11}$
Подшипник водяного колеса	$3.6 \cdot 10^{-10} \dots 4.9 \cdot 10^{-9}$
Тела качения подшипников, работающих в водной среде ( $\sigma_{max} < 2000$ МПа)	$(0.7...2) \cdot 10^{-10}$
То же при $\sigma_{max} > 2000$ МПа	$(1.3...4.3) \cdot 10^{-9}$
Бронзовый подшипник без смазки	$(1.1...1.6) \cdot 10^{-6}$

Интенсивность изнашивания элементов модельных трибосистем

Структура ТМС	Интенсивность изнашивания $I_p$
Графитная щетка по графитному шлифовальному кольцу; соответствует износу 1 мм на пути скольжения $10^6$ км	$(1...1.4) \cdot 10^{-13}$
Испытание «изнашивающая чаша»	$7.6 \cdot 10^{-12} \dots 2.2 \cdot 10^{-8}$
Испытание на изнашивание струей	$7.9 \cdot 10^{-12} \dots 2.2 \cdot 10^{-8}$
Испытание шлифовальной шкуркой	$1.9 \cdot 10^{-9} \dots 3.9 \cdot 10^{-6}$
Испытание колодок	$3.7 \cdot 10^{-9} \dots 6.6 \cdot 10^{-8}$
Испытание по плоской кольцевой поверхности	$1.2 \cdot 10^{-8} \dots 1.2 \cdot 10^{-5}$
Машина трения Тимкена	$1.6 \cdot 10^{-8} \dots 2.6 \cdot 10^{-5}$
Прибор «перекрещивающиеся цилиндры»	$(1.0 \dots 6.2) \cdot 10^{-6}$
Прибор «граммофонная пластинка»	$(1.6 \dots 2.4) \cdot 10^{-6}$
Четырехшариковая машина	$1.0 \cdot 10^{-5} \dots 2.0 \cdot 10^{-4}$
Испытание на ударно-абразивное изнашивание закаленных	$(2 \dots 3.5) \cdot 10^{-5}$

Интенсивность изнашивания материалов при обработке резанием

Вид обработки	Интенсивность изнашивания $I_{\text{н}}$
Приработка подшипника скольжения	$7.7 \cdot 10^{-10} \dots 2.4 \cdot 10^{-9}$
Притирка	$(5.6 \dots 7.7) \cdot 10^{-8}$
Пиление металлов	$5.3 \cdot 10^{-6} \dots 8.5 \cdot 10^{-5}$
Опиловка	$3.9 \cdot 10^{-6} \dots 4.7 \cdot 10^{-5}$
Шлифование	$7.2 \cdot 10^{-5} \dots 3.4 \cdot 10^{-4}$
Фрезерование	$3.5 \cdot 10^{-4} \dots 1.4 \cdot 10^{-3}$