

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский государственный аграрный университет»

Институт механизации и технического сервиса

Кафедра общеинженерных дисциплин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА СИЛ ТРЕНИЯ ВО ВРАЩАТЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПАРЕ

Лабораторный практикум для выполнения лабораторных и самостоятельных работ по теории механизмов и машин для студентов очной и заочной формы обучения по направлениям подготовки:

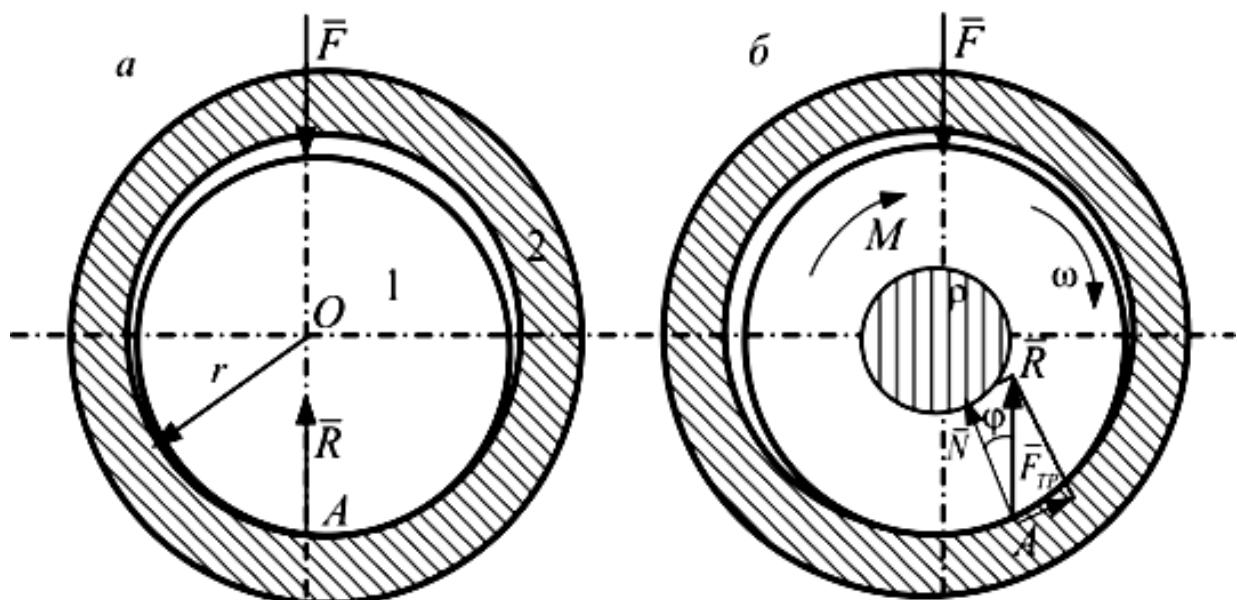
35.03.06 - «Агроинженерия»,

23.03.03 - «Эксплуатация транспортно -
технологических машин и комплексов»,

20.03.01 «Техносферная безопасность»,

44.03.04 - Профессиональное обучение и

23.05.01 – «Наземные транспортно-технологические средства»



Казань, 2021

УДК 621.01
ББК 31.365 я73

Составители: Яхин С.М., Пикмуллин Г.В., Мудров А.П., Гургенидзе З.Д.

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация и ремонт машин» ФГБОУ ВО Казанский ГАУ Шайхутдинов Р.Р.

Д.т.н., доцент кафедры «Автомобильных двигателей и сервиса» КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполев Самойлов Д.Н.

Лабораторный практикум для выполнения лабораторных и самостоятельных работ по теории механизмов и машин обсуждены и рекомендованы к печати на заседании кафедры «Общие инженерные дисциплины» Казанского ГАУ (протокол № 9 от 09.03.2021г.) и заседании методической комиссии Института механизации и технического сервиса Казанского государственного аграрного университета (протокол №8 от 29.03.2021г.).

Яхин С.М. Определение момента сил трения во вращательной кинематической паре: Лабораторный практикум для выполнения лаб. и самост. работ / С.М. Яхин, А.П. Мудров, Г.В. Пикмуллин, З.Д. Гургенидзе. - Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2021. - 16 с.

Лабораторный практикум предназначены для выполнения лабораторных и самостоятельных работ по дисциплине «Теория механизмов и машин» и способствуют формированию общепрофессиональных компетенций для направлений подготовки: 35.03.06 «Агроинженерия», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 20.03.01 «Техносферная безопасность», 44.03.04 - Профессиональное обучение и 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства».

Содержит методики определения момента сил трения аналитическим и экспериментальным путем. Приводятся описание лабораторной установки и программа обработки экспериментальных данных на ЭВМ.

УДК 621.01
ББК 31.365 я73
©Казанский государственный аграрный университет, 2021 г.

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум содержит учебно-методический материал для выполнения лабораторной работы по определению момента сил трения во вращательной кинематической паре.

Работа выполняется на лабораторных установках – моделях механизмов.

К выполнению лабораторной работы можно приступить только после изучения соответствующей темы. Во время выполнения лабораторной работы можно пользоваться конспектом лекций, учебной и справочной литературой.

Все необходимые расчёты обязательно должны быть доведены до окончательного числового результата.

Лабораторная работа, сдаваемая студентами на проверку, должна быть выполнена и оформлена в соответствии с требованиями.

По лабораторной работе составляется отчёт, который должен содержать номер и наименование работы, краткое её содержание, схему механизма и краткое её описание, результаты измерений и расчётов, краткие выводы, содержащие объяснение полученных результатов с точки зрения теории. Отчёт выполняется студентами в часы, отведённые на выполнение лабораторной работы по расписанию.

При условии правильности полученных результатов и сделанных выводов, а также при удовлетворительных ответах на вопросы преподаватель утверждает выполненную работу с проставлением зачёта.

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА СИЛ ТРЕНИЯ ВО ВРАЩАТЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПАРЕ

1. Цель и общие предпосылки выполнения работы

1.1 Цель работы

Экспериментальным путем определить момент сил трения во вращательной кинематической паре и сравнить его со значением, полученным теоретическим способом. Исследовать влияние относительной угловой скорости звеньев и угла между направлением вектора, внешней нагрузки и осью вращения на значение момента.

1.2. Общие предпосылки

Опорные узлы современных гидравлических паровых и газовых турбин двигателей внутреннего сгорания поршневых компрессоров, промышленных роботов и других машин, применяемых как в промышленности, так и в сельском хозяйстве, выполняются в виде подшипников скольжения.

Подшипники скольжения - это опоры вращающихся деталей, работающие в условиях скольжения поверхности цапфы по поверхности подшипника.

Широкое применение подшипников скольжения в настоящее время можно объяснить наличием в них целого ряда преимуществ, главными из которых являются возможность демпфирования ударных нагрузок, передаваемых на опоры машин, отсутствие ограничений по частоте вращения и малые размеры.

Существует большое многообразие конструкций подшипников скольжения, но с точки зрения теории механизмов и машин любая из них представляет собой подвижное соединение двух звеньев, обеспечивающее их вращение, и называется вращательной кинематической парой или шарниром.

В процессе работы машинного агрегата направление осей во вращательных кинематических парах может изменяться или оставаться все время постоянным. Так, на примере структурной схемы промышленного робота (рисунок 1) можно видеть, что ось неподвижного шарнира *A* расположена вертикально, у подвижного шарнира *B* - всегда только горизонтально, а у шарниров *C* и *D* - ось может занимать любое произвольное положение. Опорные поверхности валов, передающие радиальную нагрузку и расположенные в его средней части, называются шейкой, а расположенные на

конце - шипом. К ним относятся опорные поверхности звеньев 2, 3 и 5. Если опорная поверхность передает усилие по направлению оси вращения или параллельно ей, то она называется пятой (опорная поверхность звена 1), а сам подшипник - подпятником (шарнир *A*).

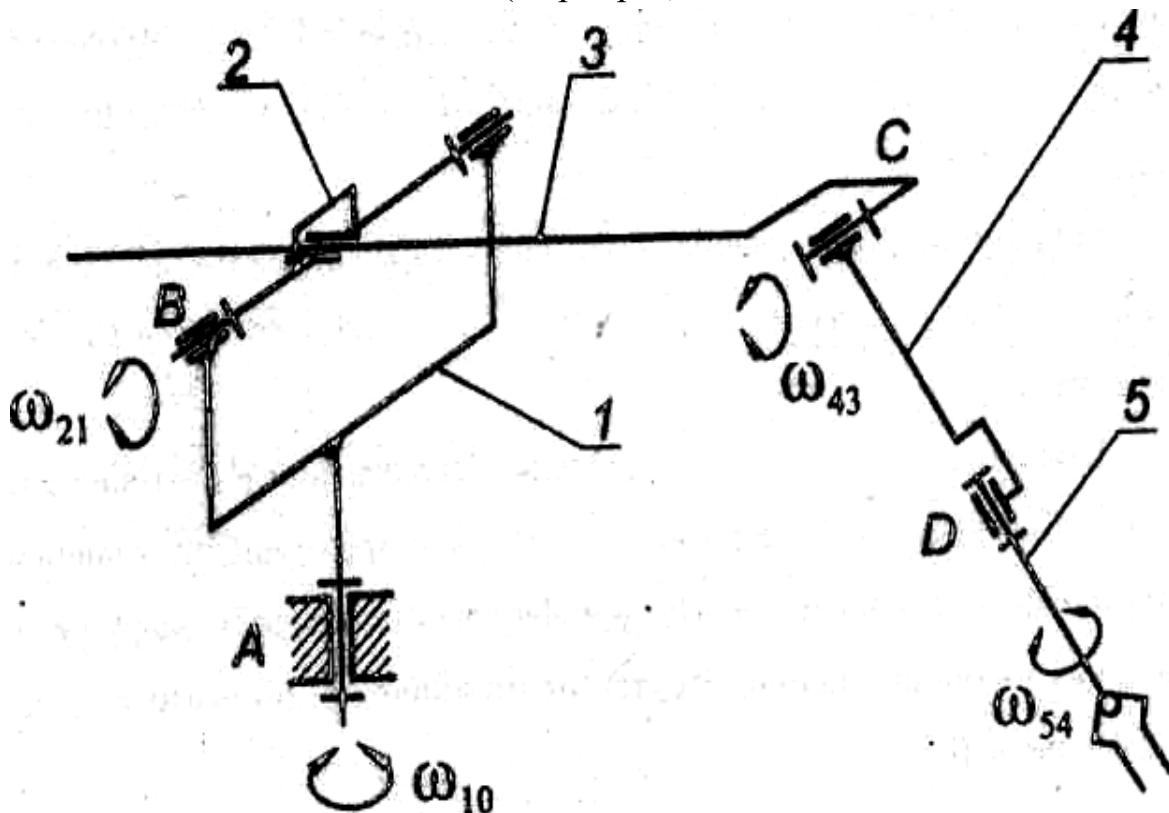


Рисунок 1 - Структурная схема промышленного робота

Силы трения в подшипниках скольжения создают момент сопротивления, препятствующий относительному вращению звеньев. При прочих равных условиях момент сил трения в шарнире зависит от положения его оси вращения.

2. Аналитическое определение момента трения

Рассмотрим шарнир с произвольным положением оси вращения (под углом β к вертикали). Пусть вал (звено 4) под воздействием движущего момента M вращается с угловой скоростью ω_{43} относительно бронзовой втулки звена 3 со сменным грузом, вес которого представляет внешнюю нагрузку (рисунок 2). Разложив вес G_3 на составляющие F_r и F_x , отмечаем, что вращательная пара работает и как подпятник, и как подшипник. Цилиндрическая опорная поверхность вала 4 образует шип, а торцевая поверхность - пяту. Момент сил трения равен сумме моментов сил трения шипа и пяты.

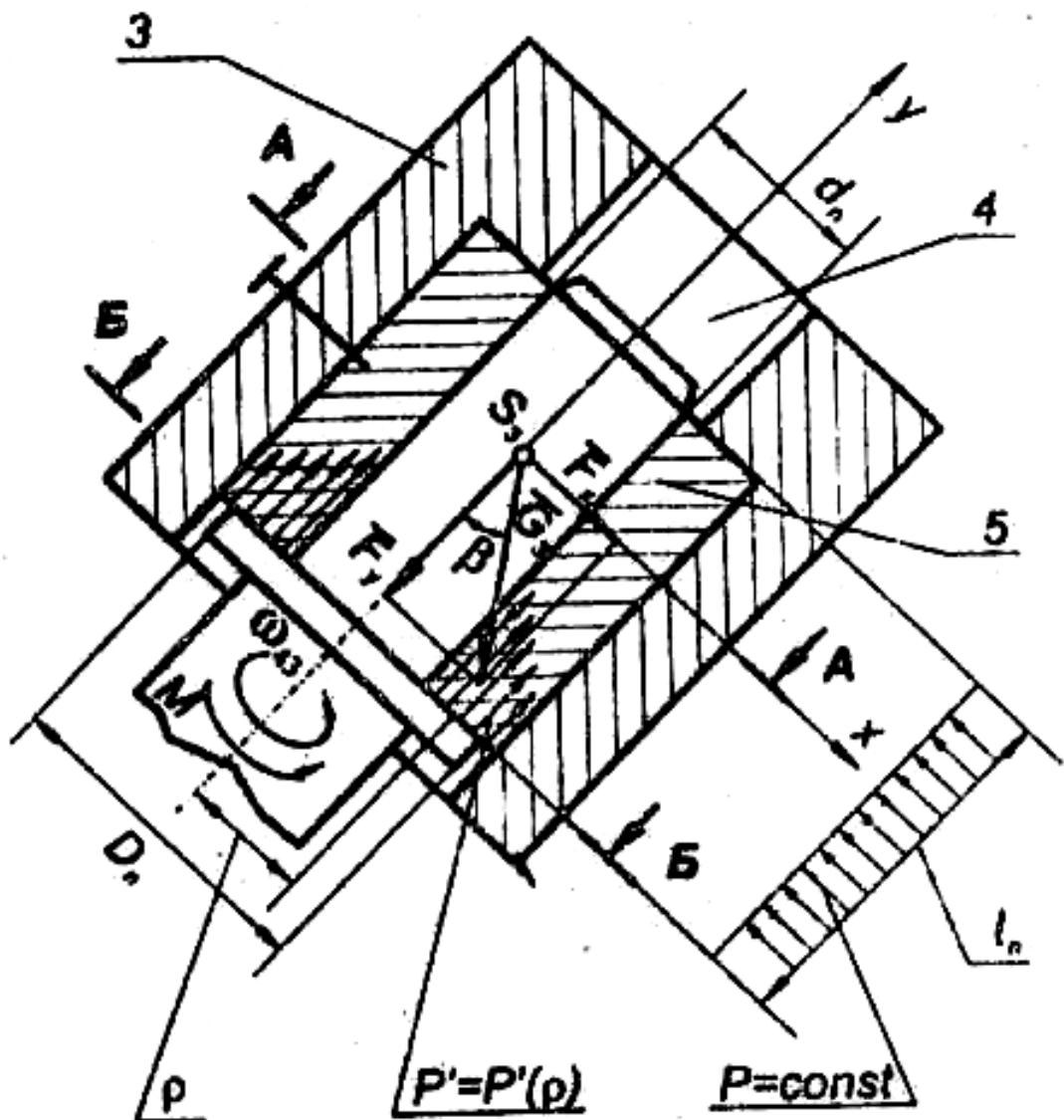


Рисунок 2 – Шарнир с произвольным положением оси вращения

Момент сил трения шипа (шейки) равна:

$$M_T \int_S dM_T = \int_S dF_T r_n, \quad (1)$$

где $dF_T = f \cdot dN$ - сила трения на элементарной площадке dS поверхности контакта;

r_n - радиус шипа;

f - коэффициент трения скольжения;

$dN = p \cdot dS$ - нормальное давление на элементе;

p - удельное давление.

Элементарная площадка контакта на цилиндрической поверхности вала равна:

$$dS = l_n \cdot r_n \cdot d\psi, \quad (2)$$

здесь l_n - длина подшипника;

$d\psi$ - центральный элементарный угол.

После подстановки указанных выше величин формула (1) преобразуется так:

$$M_T = f \cdot r_n^2 \cdot l_n \int_S \psi_0 p \cdot d\psi, \quad (3)$$

где ψ_0 - центральный угол, ограничивающий контактную поверхность шипа в поперечном сечении вала (рисунок 3).

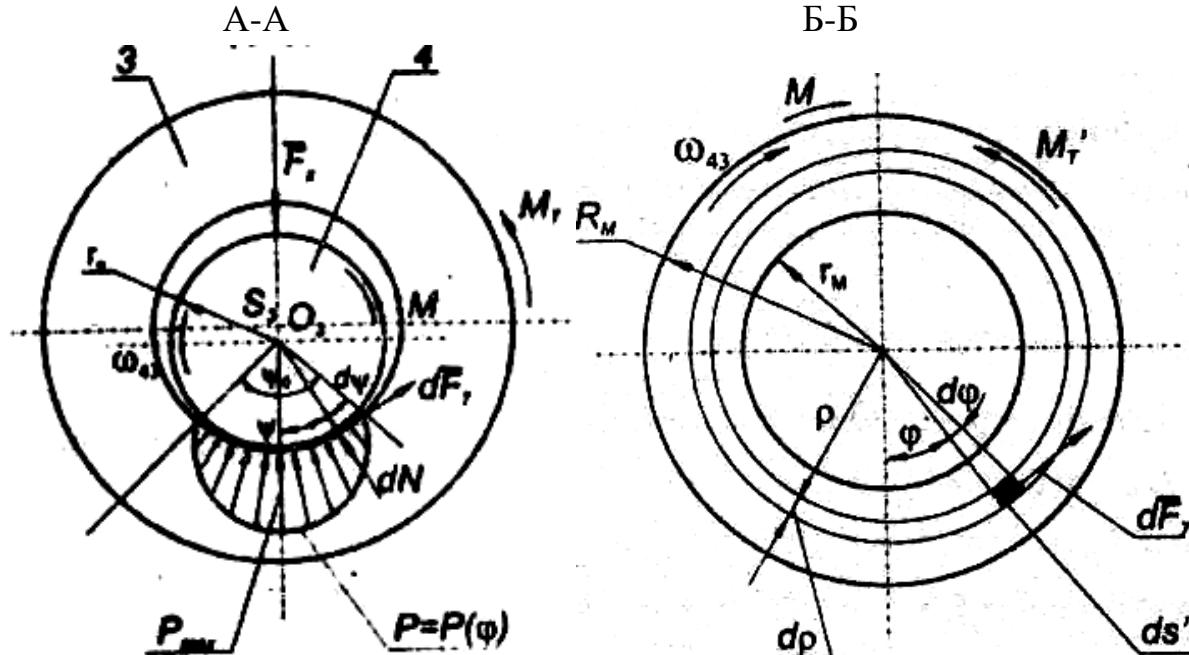


Рисунок 3 - Элементарная площадка контакта на цилиндрической поверхности вала

Из уравнения (3) следует, что момент сил трения зависит от вида функции распределения удельного давления $p = p(\psi)$. Для идеального без зазорного шарнира $p = const$, а центральный угол $\psi_0 = 2\pi$. Тогда по формуле (3) получим:

$$M_T = \pi \cdot f \cdot r_n^2 \cdot l_n. \quad (4)$$

Удельное давление выражается через приходящуюся на шип составляющую F_x нагрузки G_3 , путем составления уравнения равновесия сил, действующих относительно оси X :

$$F_x - \int_S dN \cdot \cos \psi = 0. \quad (5)$$

Подставив значение $dN = p \cdot r_n \cdot l_n \cdot d\psi$ уравнение (5) и интегрируя в пределах $\psi = \pm \pi/2$, получим:

$$F_x = p \cdot r_n \cdot l_n \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \varphi \cdot d\varphi = 2p \cdot r_n \cdot l_n, \quad (6)$$

откуда удельное давление:

$$p = F_x / (2r_n \cdot l_n). \quad (7)$$

Тогда момент трения шипа:

$$M_T = \frac{\pi}{2} f \cdot F_x \cdot r_n. \quad (8)$$

Выражение $(\pi/2) \cdot f$ - приведенный коэффициент трения шипа

$f_{\text{ш}}$. После этого момент трения выражается так:

$$M_T = f_{\text{ш}} \cdot F_x \cdot r_n . \quad (9)$$

В реальных вращательных парах всегда имеется зазор, вследствие которого удельное давление $p = p_{\max} \cdot \cos\psi$, а центральный угол $\psi_0 < \pi$ (рисунок 3). Поэтому в формуле (9) приведенный коэффициент трения $f_{\text{ш}}=1,27f$.

Осевая составляющая F_y внешней нагрузки G_3 на опорной поверхности вала 4 создает момент сил трения M_T' . Выделим на расстоянии ρ от оси вращения элемент опорной поверхности:

$$dS' = p \cdot dp \cdot d\varphi . \quad (10)$$

Нормальное давление на этом элементе:

$$dN' = p' \cdot dS' = p' \cdot \rho \cdot dp \cdot d\varphi , \quad (11)$$

где p' - удельное давление на пятне.

Тогда элементарный момент сил трения пятнышка можно выразить так:

$$dM'_1 = dF'_1 \cdot p = f \cdot dN' \cdot p = f \cdot p' \cdot p^2 \cdot dp \cdot d\varphi . \quad (12)$$

Полный момент сил трения пятнышка получим, проинтегрировав выражение (12) в пределах изменения переменных φ (от 0 до 2π) и ρ (от r_n до R_n):

$$M'_1 = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{r_n}^{R_n} f \cdot p' \cdot p^2 \cdot dp = 2\pi \cdot f \int_{r_n}^{R_n} p' \cdot p^2 \cdot dp . \quad (13)$$

Для новых (неизношенных) пятнышек и под пятника давление по всей опорной поверхности остается постоянным, тогда величина удельного давления:

$$p' = F_y / \pi(R_n^2 - r_n^2) . \quad (14)$$

После подстановки в уравнение (10) выражения (11) и интегрирования момент сил трения:

$$M'_T = \frac{2}{3} f \cdot F_y \frac{R_n^3 - r_n^3}{R_n^2 - r_n^2} . \quad (15)$$

Считается, что для приработавшихся пятнышек и под пятника удельное давление $p' = p'(p)$ (рис.2 а) изменяется обратно пропорционально и определяется по зависимости:

$$p' = \frac{F_y}{2\pi} \cdot p \cdot (R_n - r_n) . \quad (16)$$

Момент сил трения в этом случае находится также по формуле (10) с учетом зависимости (13):

$$M'_T = \frac{1}{2} f \cdot F_y \cdot (R_n + r_n) . \quad (17)$$

Общий момент сил трения во вращательной кинематической пары при произвольном положении оси вращения может быть представлен как сумма моментов шипа (шайки) и пятнышка:

$$\Sigma M'_T = M_T + M'_T . \quad (18)$$

Для нового шарнира (рисунок 4) зависимость (15) преобразуется так:

$$\Sigma M_T = f \cdot G_3 [(\pi/2) \cdot r_n \cdot \sin \beta + 2/3 \cdot (R_n^3 + r_n^3) / (R_n^2 - r_n^2) \cos \beta]. \quad (19)$$

Для приработанного:

$$\Sigma M_T = f \cdot G_3 [1,27 r_n \cdot \sin \beta + 0,5(R_n + r_n) \cos \beta], \quad (20)$$

где G_3 - вес груза (3); f - коэффициент трения скольжения.

Коэффициент трения зависит от свойств используемых материалов, шероховатости и твердости контактируемых поверхностей, вида и вязкости смазки, рабочей температуры и относительной скорости движения и других факторов. В зависимости от величины относительной скорости различают три режима трения, при которых коэффициент трения значительно изменяется (рисунок 4).

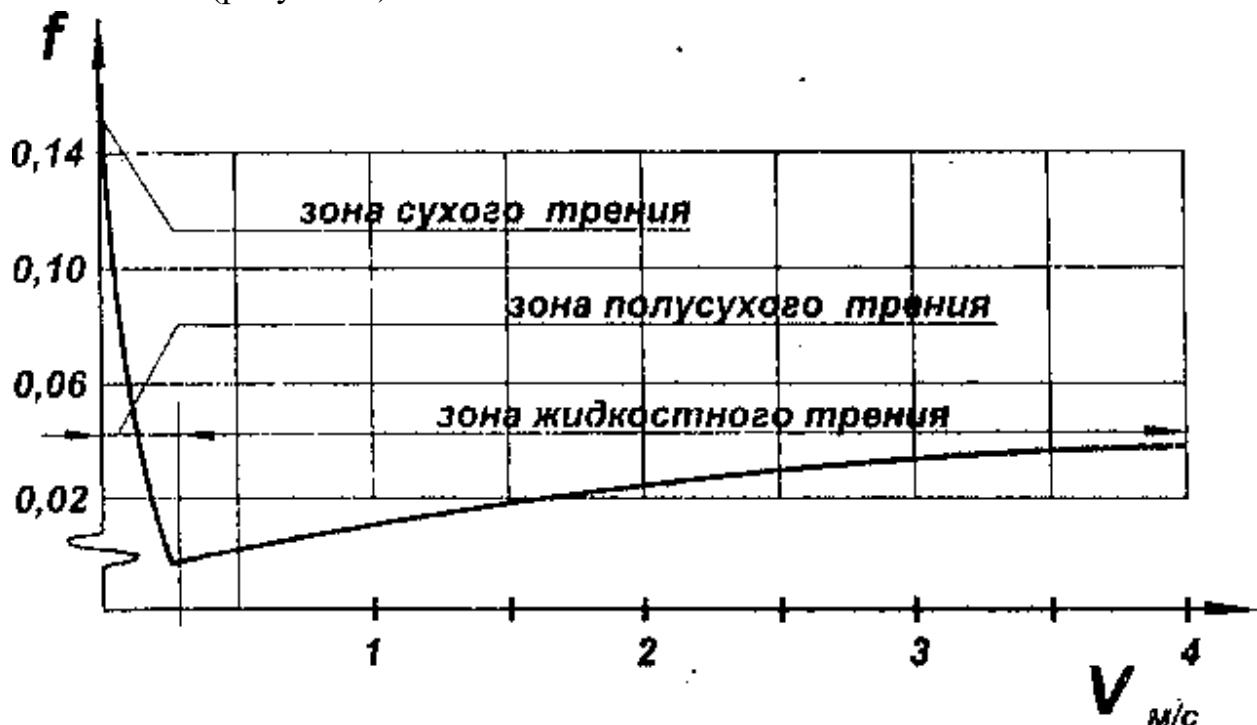


Рисунок 4 - Коэффициент трения материалов

Режим сухого трения наблюдается при относительном скольжении опорных элементов без смазки, характеризуется наибольшим значением коэффициента трения для заданных материалов. Полусухое (граничное) трение отличается наличием в отдельных местах контакта тонких смазочных пленок, коэффициент трения значительно изменяется даже при малых колебаниях относительной скорости. При жидкостном трении тончайшие слои смазки прилипают к опорным поверхностям звеньев, и относительное скольжение их сопровождается только внутренним трением в смазочном материале. Здесь коэффициент трения наименьший и незначительно изменяется при больших перепадах скорости.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА СИЛ ТРЕНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Лабораторная установка

На установке, схема которого показана на рисунок 5, можно измерить момент сил трения во вращательной кинематической паре при различных положениях оси вращения, изменяя в случае необходимости величину нагрузки, диаметр опоры, вид смазки и частоту вращения. Основные узлы установки смонтированы на вертикальной плите 1, которую можно поворачивать на угол β с шагом 15° относительно оси «O» в пределах от ноля до $\pi/2$. Вращение от электродвигателя 2 посредством ременной передачи 12 сообщается валу 4, установленному на шарикоподшипниках в корпусе, прикрепленном к плите 1. На верхний конец вала 4, представляющий собой шип (при $\beta = \pi/2$) или пяту (при $\beta = 0$), насаживается бронзовая втулка 5, и образуется вращательная кинематическая пара скольжения. Внешнюю нагрузку можно изменять путем замены груза 3, жестко закрепляемого на бронзовой втулке 5. Реактивный момент, возникающий от сил трения на контактирующих поверхностях вала 4 с бронзовой втулкой 5, посредством рычага создает прогиб упругой пластины 9, к которой прикреплена шторка 7, перекрывающая поток света на фотодиод 6 от лампы 8. Момент сил трения может быть определен по графику момента от силы тока, образующего в цепи фотодиода 6 при открытии шторки 7 в процессе тарировки измерительной системы. Значение силы тока регистрируется по показаниям микроамперметра 10 при положении «M» (момент) переключателя момента. Другим методом измерения момента сил сопротивления является использование датчиков проволочных сопротивлений, которые наклеиваются непосредственно на пластину 9. При прогибе последней изменяются сопротивление проволочных датчиков и сила тока, протекающего в их цепи. После усиления силы тока, пропорциональная моменту сил трения, регистрируется самопишущим прибором. Частота вращения вала 4 измеряется тахогенератором 11, силу тока которого, пропорциональную частоте вращения, измеряют микроамперметром 10 при положении "C" (скорость)

переключателя.

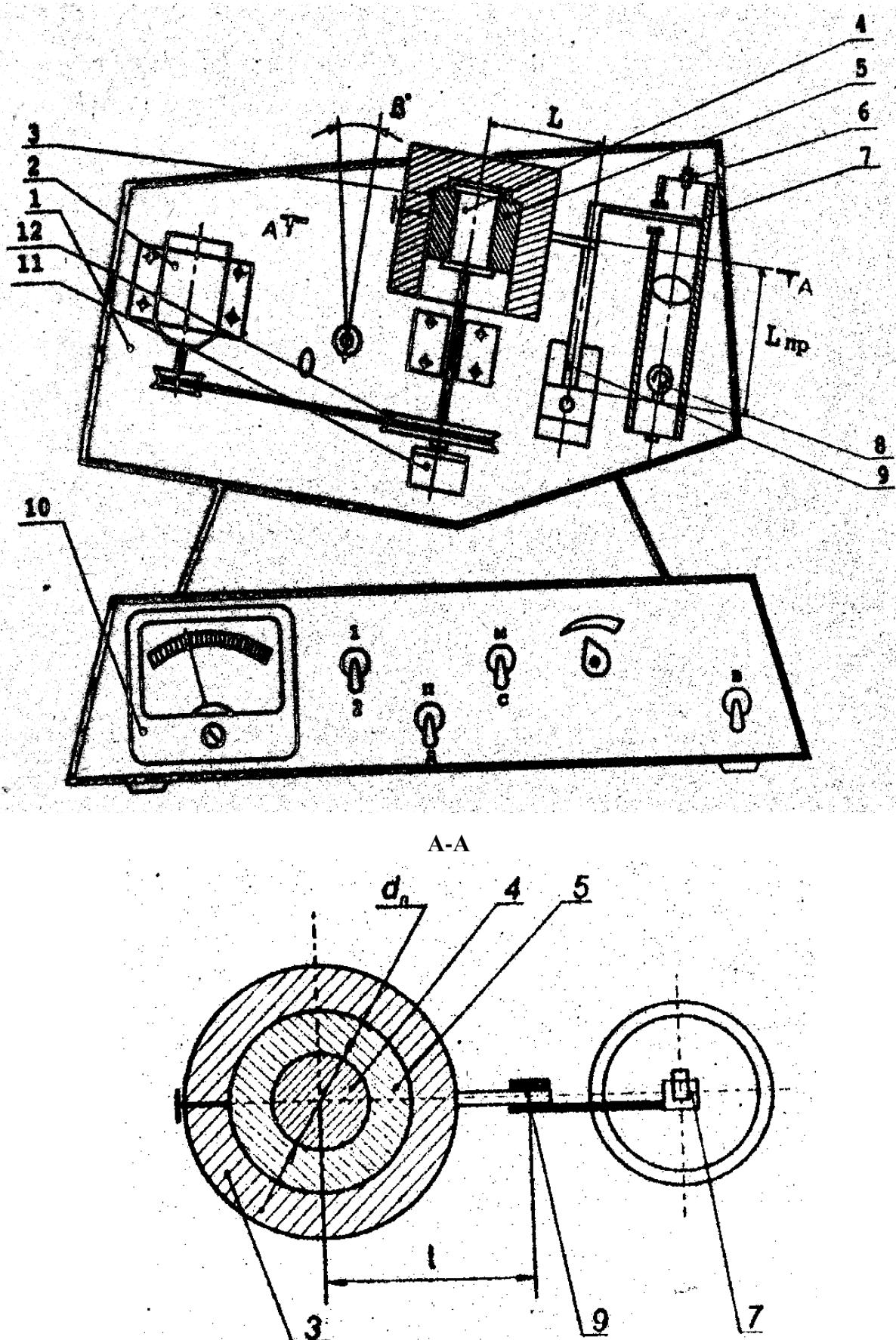


Рисунок 5 - Схема лабораторной установки

3.2. Порядок выполнения работы

1. Внимательно ознакомиться с теоретическими положениями и описанием экспериментальной установки по определению момента сил трения во вращательной кинематической паре.

2. Протарировать измерительную систему:

а) включить усилитель и прогреть его в течение 10...20 мин;

б) проверить нули усилителей и, при необходимости, провести балансировку тензометрического моста;

в) отвернуть стопорный винт, перевести измерительную пластину 9 (рисунок 2) в горизонтальное положение и зафиксировать ее;

г) нагрузить пластину 9 последовательно тарировочными грузами массой 20, 40, 60 г и на каждой ступени нагружения (включая нулевую) произвести запись уровня тарировочных сигналов;

д) вернуть измерительное устройство в исходное положение.

3. Исследовать момент сил трения при изменении скорости вращения и постоянном угле наклона оси шарнира β . Повернуть плиту 1 на заданный угол β . На вал 4 установить бронзовую втулку 5 с грузом 3, введя рычаг груза в паз пластины 9 (рисунок 3). Переключатель «М-С» (рисунок 5) поставить в положение «С» - измерение скорости. Включить двигатель и регулируя его скорость для пяти фиксированных значений произвести запись момента сил трения (с шагом 15...20 делений по шкале прибора 10). Результаты занести в таблицу 2 отчета.

4. Исследовать момент сил трения при измерении угла β и постоянной скорости вращения. Установить по шкале прибора 10 и тарировочному графику заданное значение угловой скорости вала 4. Изменяя β от 0 до 90° , сохраняя угловую скорость, производить запись момента сил трения через каждые 15° . Результаты занести в таблицу.

5. Расшифровать записанные диаграммы, измерив на них средние значения ординат моментов сил трения при:

а) тарировании уск;

б) различных значений скорости вращения y_{mi} ;

в) различных углах наклона оси β - $y_{\beta i}$.

По тарировочному графику $n = f(I)$, аппроксимированному прямой $n = B + CI$, определить коэффициенты B и C .

6. Ввести в ЭВМ программу MTR, (Приложение 1), и в соответствии с инструкциями программы ввести в ЭВМ результаты эксперимента. Текст программы приведен в приложении 1, где приняты следующие условные обозначения (таблица 1):

Таблица 1 - Условные обозначения

Переменная	Обозначения в распечатке	Обозначения в программе
G_3	G	G
d_n	$D\Pi$	D
b	B	$D2$
c	C	C
y_{GK}	YCK	$I(k)$
y_{mi}	EM_i	$I1(i)$
y_{ni}	XN_i	$N(i)$
$y_{\beta i}$	YB_i	$I2(j)$
M_i	M_i	$M(i)$
n_i	N_i	$N(i)$
$M_{TЭj}$	$MЭ$	$M1(j)$
M_{Tj}	MT	$M2(j)$
β_i	$BETA$	$W2(j)$

Здесь $k = 1\dots3$, $i = 1\dots5$, $j = 1\dots7$ - порядковые номера измерений.

7. Провести анализ полученных экспериментальных зависимостей $M_T = f(\boldsymbol{n})$ и $M_T = f(\boldsymbol{\beta})$ и сделать выводы по работе, в которых отразить соответствие расчетных значений моментов сил трения с экспериментальными.

3 Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель лабораторной работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Экспериментальные данные.
5. Таблица 2 для трех значений угла α_1° ($0^\circ, 10^\circ, 30^\circ$)

Таблица 2

α_1°	φ_1°	0	30	60	90	120						
	φ_2											
	φ_2'											
	i_{12}											
	$\delta\%$											

6. Графики
7. Выводы.

Вопросы для контроля

1. Назовите виды трения, характерные для низших, высших кинематических пар.
2. Как объяснить наличие трения скольжения?
3. Каким закономерностям подчиняется трение скольжения?
4. Как вычисляется сила трения скольжения?
5. Что такое коэффициент трения? От чего зависит величина коэффициента трения?
6. Что такое угол трения, конус трения?
7. Какую роль играют угол и конус трения в поступательной паре?

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Какая физическая зависимость используется при определении сил трения в кинематических парах? Трение в поступательных парах, угол и конус трения. Как можно использовать эти понятия для определения возможности движения тела под действием внешней результирующей силы?
2. Для чего используется наклонная плоскость? Каково соотношение движущих сил и сил сопротивления, при движении тела вверх по наклонной плоскости?
3. Каково влияние формы направляющих на силы трения (на примере клинчатых направляющих)? Понятие – приведенный коэффициент трения.
4. Какие гипотезы рассматриваются при определении сил (моментов) трения во вращательных парах? Приведенные коэффициенты трения на цилиндрической поверхности, их сравнительная оценка для разных гипотез. Моменты трения на торцевых поверхностях, их сравнительная оценка для разных гипотез.
5. Формула Л.Эйлера для определения силы трения гибкого тела о жесткую цилиндрическую поверхность. Какой дополнительный фактор по сравнению с трением твердых тел появляется в данном случае, с помощью которого можно существенно влиять на величину силы трения?
6. Каков физический смысл коэффициента трения качения? Какую он имеет размерность? Как записывается условие чистого качения?
7. Как определить потери на трение (мощность трения) в кинематических парах (во вращательной паре 5 класса, в поступательной паре 5 класса, в высшей кинематической паре 4 класса)?

Приложение 1

```

1 REM РАСЧЕТ МОМЕНТА ТРЕНИЯ ВО ВРАЩАТЕЛЬНОЙ КП
2 DIM I(4), II(5), I2(7), M(5), N(5)
3 DIM W2(7), M1(7), B(7), M2(7), W1(7)
4 INPUT 'ВВЕДИТЕ G, DΠ, B, C' G, D, B2, C
5 PRINT
6 INPUT 'ВВЕДИТЕ YG1, YG2, YG3' I(1), I(2),I(3)
7 PRINT
8 INPUT 'ВВЕДИТЕ XN1, XN2, XN3, XN4, XN5' XN1 ,XN2,XN3,XN4,XN5
9 PRINT
10 INPUT 'ВВЕДИТЕ YB1, YB2, YB3, YB4' YB1, YB2, YB3, YB4
11 PRINT
12 INPUT 'ВВЕДИТЕ YB5, YB6, YB7' YB5, YB6, YB7
13 LET L=0.05: LET D1=0.018; LET L1=0.02
14 LET Q=(I(1)/0.2+I(2)/0.4+I(3)/0.6)/(3*L)
15 FOR I=1 TO 5
16 LETM(I)=II(I)/Q
17 LETN(I)=B2+C*N(I)
18 NEXT I
19 LETW1(0)=-15
20 FOR J=1 TO 7
21 LETM1(J)=I2(J)/Q
22 NEXT J
23 LETF=M1(7)*2/(G*D)
24 LETF1=M1(1)*4/(G*(D+D1))
25 FOR J=1 TO 7
26 LETW1(J)=15+W1(J-1)
27 LETW2(J)=W1(J)
28 LETW1(J)=RAD(W1(J))
29 LETM2(J)=(G/2)*(0.5*(D+D1)*F1*COS(W1(J))+D'*F*SIN(W1(J)))
30 LETW1=DEG(W1(J))
31 NEXT J
32 LET T=20/M1(1)
33 PRINT
34 PRINT'ИЗМ. МОМЕНТА ТРЕНИЯ В НМ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ В 1/C'
35 PRINT' M1 M2 M3 M4 M5'
36 PRINT!2.4!M(1);M(2);M(3);M(4);M(5)
37 PRINT' N1 N2 N3 N4 N5'
38 PRINT!3.3!N(1);N(2);N(3);N(4);N(5)
39 PRINT
40 PRINT' МЭ,НМ MT,НМ БЕТА,ГРАД * ____ М,НМ'
41 FOR J=1 TO 7
42 IF M1(J)>M2(J) THEN GOTO 45
43 PRINT!2.4!M1(J);M2(J);W2(J);I' TAB(26+T*M1(J))'*TAB(26+T*M2(J)
44 GOTO 46
45 PRINT!2.4!M1(J);M2(J);W2(J);I'TAB(26+T*M2(J))'*TAB(26+T*M1(J)
46 NEXT J
47 STOP
48 END

```

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

а) основная литература

1. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин. / И.И. Артоболевский. - М.: Альянс, 2016. - 640 с.
2. Жога, В.В. Курсовое проектирование по теории механизмов и машин: учебно-методическое пособие / В. В. Жога, И. А. Несмиянов, Н. С. Воробьева [и др.]. - Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2019. - 80 с. - Текст: электронный. - URL: <https://new.znanium.com/catalog/product/1087912>.
3. Борисенко, Л.А. Теория механизмов, машин и манипуляторов: Учебное пособие / Л.А. Борисенко. - М.: Инфра-М, 2014. - 448 с.
4. Чмиль, В. П. Теория механизмов и машин: учебно-методическое пособие / В. П. Чмиль. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2017. — 280 с. — ISBN 978-5-8114-1222-8. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/91896>.

б) дополнительная литература

1. Машнев, М.М. Теория механизмов и машин и детали машин / М.М. Машнев, Е.Я. Красковский, П.А. Лебедев. – СПб.: Машиностроение, 2015. - 511 с.
2. Горев Э.А. Типовой лабораторный практикум по теории механизмов и машин. - М.: Машиностроение, 2012. - 160 с.
3. Мищенко, Е.В. Теория механизмов и машин: учебно-методическое пособие / Е.В. Мищенко. — Орел: ОрелГАУ, 2018. — 50 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/118767>.