

## **ВВЕДЕНИЕ**

Повышение надёжности выпускаемой техники и эффективность ее использования являются основными условиями повышения производительности труда и увеличения объемов производимой и транспортируемой продукции.

Задача инженерно-технической службы – обеспечить грамотное и эффективное использование машин, реализовать те показатели надежности, которые заложены в конструкции при их создании. При этом надежные и долговечные машины могут быть созданы только при удачном решении теоретических и прикладных задач трения, смазывания и изнашивания, т. е. задач трибологии и триботехники.

Знания зависимостей изменения начальных свойств материалов деталей в процессе эксплуатации позволяют решить основополагающую задачу трибологии – повышение износостойкости, долговечности, безотказности машин, их агрегатов и сборочных единиц. Кроме того, знания теоретических основ изнашивания обеспечивают возможность добиться долговечной и безотказной работы машин – непременного условия достижения высоких показателей качества, производительности и экономичности при производстве различных видов товарной продукции. Всего этого невозможно достичь без знания основ методики трибологических испытаний пар трения.

В книге приведено 14 работ для учебных занятий, на каждом из которых обучающимися выполняются определенные задания. Выполненные задания оформляются в виде отчетов с представлением необходимых данных, рисунков и таблиц. Лабораторный практикум может использоваться для самостоятельной работы студентов, при их подготовке к учебным занятиям.

Целью лабораторного практикума является формирование у обучающихся теоретических и практических знаний в области трения и изнашивания, а также приобретение умений и овладение производственными навыками расчета узлов трения и статистической обработки результатов экспериментальных исследований для решения практических задач производственного характера в инженерно-технической сфере агропромышленного комплекса.

Выполнение лабораторного практикума дает возможность получить основные навыки в экспериментальной оценке фрикционных и служебных свойств трибосопряжений на различных машинах трения и приборах.

Необходимый минимум сведений об основных понятиях трибологии содержится в теоретической части каждой лабораторной работы.

При выполнении лабораторных работ у студентов формируются следующие профессиональные компетенции:

- способность к исследованию процессов трения и изнашивания в сельскохозяйственной технике;

- способность проведения инженерных расчетов для проектирования систем и объектов;

- способность обоснованно выбирать материал и назначать его обработку для получения свойств, обеспечивающих высокую надежность детали.

В результате освоения дисциплины «Трибология» обучающийся должен:

**знать:**

- динамику развития представлений о внешнем трении;

- физические основы эффекта безызносности;

- основы проектирования подвижных соединений, при которых обеспечивается их ресурс до морального износа;

- механизм избирательного переноса при трении и его закономерности;

- методы прогнозирования изнашивания с учетом механических, физико-механических и геометрических факторов;

- основные подходы к решению тепловых задач трения;

**уметь:**

- выявлять и анализировать причины увеличения скорости изнашивания;

- осуществлять поиск необходимой информации по глобальным информационным ресурсам и современным средствам телекоммуникации;

- определять оптимальные режимы работы пар трения в машинах и механизмах.

- определять износостойкость взаимодействующих при трении поверхностей и строить зависимость их износа от различных факторов;

**владеТЬ:**

- навыками расчета опоры трения без смазочного материала и при граничной смазке;

- навыками расчета коэффициента трения качения;

- навыками прогнозирования изнашивания с учетом механических, физико-механических и геометрических факторов.

Приведенные в учебном пособии материалы позволяют студентам овладеть методиками расчета опор трения без смазочного материала и при граничной смазке, коэффициента трения качения, а также методами оценки триботехнических параметров узлов трения и прогнозирования изнашивания с учетом механических, физико-механических и геометрических факторов. Разнообразные задания для самостоятельной работы позволяют добиться высокой степени интенсификации познавательной активности слушателей.

Авторы надеются, что соприкосновение студентов с реальными триботехническими процессами при проведении лабораторных работ поможет им в дальнейшей практической деятельности.

**ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ  
«ТРИБОЛОГИЯ»**

<b>Наименование модуля рабочей программы</b>	<b>Наименование лабораторной работы</b>	<b>Трудоемкость, ч</b>
<b>Модуль 1.</b> Закономерности внешнего трения и изнашивания материалов	<i>Лабораторная работа № 1.</i> Контактные задачи в трибологии	2
	<i>Лабораторная работа № 2.</i> Расчет коэффициента трения качения	2
	<i>Лабораторная работа № 3.</i> Исследование микротвердости деталей пары трения	2
	<i>Лабораторная работа № 4.</i> Определение условного предела текучести материалов методом неразрушающего контроля	2
	<i>Лабораторная работа № 5.</i> Трение в подшипниках скольжения	2
	<i>Лабораторная работа № 6.</i> Трение в подшипниках качения	2
	<i>Лабораторная работа № 7.</i> Расчет интенсивности изнашивания при упругом контакте	2
<b>Модуль 2.</b> Эффект безызносности	<i>Лабораторная работа № 8.</i> Оценка пластичности рабочих поверхностей деталей методом неразрушающего контроля	2
	<i>Лабораторная работа № 9.</i> Исследование характеристик микрogeометрии рабочей поверхности детали	4
	<i>Лабораторная работа № 10.</i> Методика определения полного ресурса соединения и допустимых без ремонта размеров соединяемых деталей	2
<b>Модуль 3.</b> Определение триботехнических характеристик материалов	<i>Лабораторная работа № 11.</i> Способы определения и исследование износа деталей машин	2
	<i>Лабораторная работа № 12.</i> Проведение испытаний материалов на изнашивание	4
	<i>Лабораторная работа № 13.</i> Расчет момента сил трения в паре вращения	2
	<i>Лабораторная работа № 14.</i> Расчет износа соединения «гильза цилиндра – поршневое кольцо» двигателя внутреннего сгорания	2

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Перед началом цикла лабораторных работ необходимо ознакомиться с правилами безопасности при эксплуатации оборудования и электроприборов. Приступая к практической части работы, студент должен ознакомиться с инструкцией по технике безопасности и строго соблюдать следующие правила.

1. Перед началом работы привести в порядок одежду (застегнуть рукава, убрать концы галстука, косынки или платка, заправить одежду так, чтобы не было развевающихся концов, убрать волосы под плотно облегающий головной убор).
2. Не получив разрешения преподавателя, оборудование не включать.
3. Перед каждым включением оборудования убедиться, что его пуск никому не угрожает, что все его части хорошо закреплены.
4. При выполнении работы нужно быть внимательным, не отвлекаться на посторонние дела и разговоры и не отвлекать других.
5. Проверить отсутствие заеданий при проворачивании деталей и привода.
6. Не одеваться и не раздеваться у работающего оборудования.
7. Обязательно отключить оборудование при возникновении следующих ситуаций:
  - уход от работающего оборудования даже на короткое время;
  - временное прекращение работы;
  - перерыв в подаче электроэнергии;
  - обслуживание, уборка и очистка оборудования;
  - обнаружение неисправности в работе оборудования.
8. Приступить к работе на оборудовании допускается только после его изучения и усвоения назначения и принципа действия всех частей. При работе учитывать состояние оборудования, показания контрольных приборов.
9. При работе с электрооборудованием, работающим под напряжением 220–380 В, необходимо иметь под ногами резиновые коврики и применять резиновые перчатки.
10. Все приводные и соединительные устройства вращающихся деталей должны быть надежно ограждены металлическими защитными кожухами.
11. Категорически запрещается пользоваться открытым огнем, а также курить в лаборатории.

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1**

## **КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ В ТРИБОЛОГИИ**

### **Цель работы**

1. Ознакомить обучающихся с вопросами контактного взаимодействия поверхностей при трении двух сферических тел.
2. Ознакомить обучающихся с методами расчета деформаций поверхности и максимального давления в центре площадки контакта при контакте двух сферических тел.
3. Привить обучающимся навыки определения деформаций поверхности и максимального давления в центре площадки контакта на основе решения уравнений задачи Герца при контакте двух сферических тел.

### **Теоретические сведения**

Взаимодействие твердых тел в физических и механических процессах, развивающихся в зоне трения, можно правильно оценить только с учетом микрогоеометрии поверхностей деталей машин. Теория контактирования шероховатых поверхностей основывается на классических решениях контактных задач упругости и пластичности и на достижениях в области исследований качества поверхности.

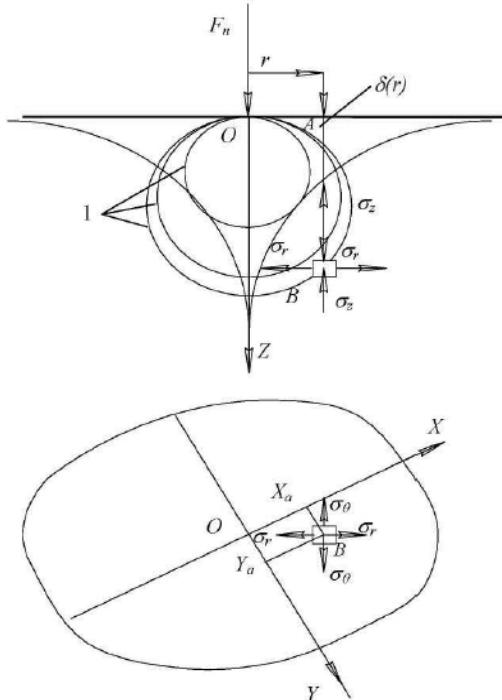
Поскольку решения контактных задач получены для тел, обладающих правильной геометрической формой и идеальными физико-механическими свойствами, в то время как выступы реальных поверхностей деталей машин разнообразны по форме и их свойства далеки от идеальных, то для расчета характеристик контакта используют статистические методы, позволяющие описать деформацию некоторого усредненного выступа и учесть законы распределения выступов и волн на поверхности. Такой подход позволяет получить расчетные формулы, дающие точность, достаточную для инженерных расчетов [10].

Вопросы контактного взаимодействия поверхностей при трении решаются на основе зависимостей, полученных для контакта двух сферических поверхностей Г. Герцем [10].

Исследуются напряжения и деформации, вызываемые действием средоточенной нагрузки на упругое полупространство.

Упругое полупространство – это бесконечно упругая среда, ограниченная с одной стороны плоской поверхностью. При этом упругая среда принята изотропной.

Напряжения и деформации упругого полупространства показаны на рисунке 1.1.



**Рис. 1.1.** Напряжения и деформации под действием сосредоточенной силы:  
I – поверхности равного результирующего напряжения.

Упругие деформации от нормальной нагрузки  $F_n$ , действующей на поверхность, определяются по формуле

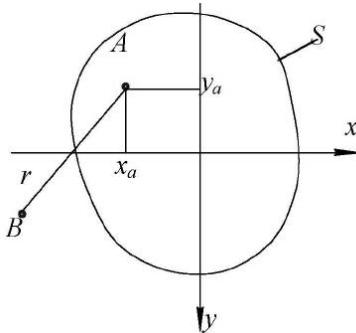
$$\delta = \frac{1-\varepsilon^2}{\pi \cdot E} \cdot \frac{F_n}{r}, \quad (1.1)$$

где  $E$  и  $\varepsilon$  – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Материал в точке  $B$  зоны контакта испытывает сжимающие  $\sigma_z$  и растягивающие  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  напряжения. Напряжения на поверхности в точке  $A$  определяются зависимостями:

$$\sigma_z = 0; \sigma_r = -\sigma_\theta = \frac{1-2\varepsilon}{2\pi} \cdot \frac{F_n}{r^2}. \quad (1.2)$$

Выводы задачи Ж. Буссинеска позволяют решать задачу о деформациях поверхности под действием нагрузки, распределённой по некоторой области  $S$ , как показано на рисунке 1.2.



**Рис. 1.2.** К определению деформаций при нагрузке, распределённой по площади

Элементарное значение нормальной нагрузки в точке  $A$  с координатами  $x_a$  и  $y_a$  будет равно

$$dF_n = p(x_a, y_a) \cdot dx \cdot dy, \quad (1.3)$$

а величина деформации в точке  $B$  от этой нагрузки

$$\delta = \frac{1 - \varepsilon^2}{\pi \cdot E} \cdot \frac{p(x_a, y_a) \cdot dx \cdot dy}{r(x_a, y_a)}. \quad (1.4)$$

Полная величина деформации поверхности в точке  $B$  от нагрузки, распределённой по области  $S$ , определится интегрированием:

$$\delta = \frac{1 - \varepsilon^2}{\pi \cdot E} \cdot \iint_S \frac{p(x_a, y_a) \cdot dx \cdot dy}{r(x_a, y_a)}. \quad (1.5)$$

В 1882 г. Г. Герцем была решена задача о напряжениях и деформациях в контакте двух упругих тел вращения, при решении которой приняты следующие допущения [10]:

- величины деформаций и размеры области контакта значительно меньше размеров контактирующих тел;
- контактные напряжения не зависят от уровня общего напряжённого состояния;
- не учитывается шероховатость поверхностей;
- отсутствуют силы трения.

Герцем принятое допущение о том, что давление в зоне контакта распределяется по эллипсоиду:

$$p = p_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2}, \quad (1.6)$$

где  $p_0$  – максимальное давление в центре площади контакта, МПа;

$a$  и  $b$  – размеры полуосей эллиптической площадки контакта, м.

Это предположение впоследствии было с большой точностью подтверждено экспериментами.

Рассмотрим контакт двух сферических поверхностей, имеющий наибольшее практическое значение в трибологии. В этом случае нагрузка распределяется по круговой площадке контакта радиусом  $a$  и определяется по формуле

$$p = p_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}, \quad (1.7)$$

где  $r$  – координата точки на площадке контакта.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (1.8)$$

Полная нормальная нагрузка в контакте определяется интегрированием:

$$F_n = 2 \cdot \pi \cdot p_0 \cdot \int_0^a r \cdot \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}} \cdot dr = \frac{2}{3} \pi \cdot a^2 \cdot p_0. \quad (1.9)$$

Геометрические соотношения в контакте приведены на рисунке 1.3.

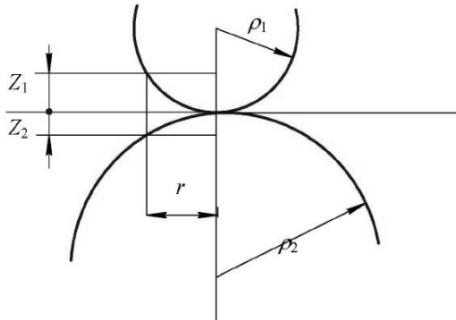


Рис. 1.3. Начальный контакт двух сферических тел

При начальном касании в точке зазор между поверхностями на расстоянии  $r$  от оси будет определяться суммой:

$$h = z_1 + z_2, \quad (1.10)$$

$$z_1 = p_2 - \sqrt{p_1^2 - r^2} = p_1 \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{r}{p_1} \right)^2} \right). \quad (1.11)$$

Так как  $r \ll p_1$ , то

$$\sqrt{1 - \left(\frac{r}{p_1}\right)^2} \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{p_1}\right)^2. \quad (1.12)$$

Отсюда получим:

$$z_1 = \frac{r^2}{2 \cdot p_1}, \quad (1.13)$$

$$z_2 = \frac{r^2}{2 \cdot p_2}. \quad (1.14)$$

Тогда зазор будет равен

$$h = \frac{r^2}{2} \left( \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} \right). \quad (1.15)$$

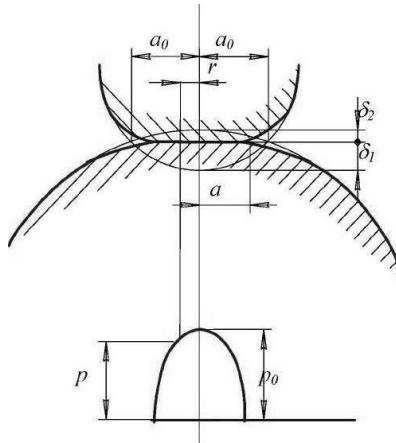
Введем понятие «приведенный радиус кривизны»:

$$p_{np} = \frac{p_1 \cdot p_2}{p_1 \pm p_2}, \quad (1.16)$$

в контакте зазор определяется выражением

$$h = \frac{r^2}{2 \cdot p_{np}}. \quad (1.17)$$

Под действием нагрузки  $F_n$  произойдёт деформация поверхностей, как показано на рисунке 1.4.



**Рис. 1.4.** Схема деформаций в контакте двух сферических тел

Фактическая площадка контакта, по которой распределяется давление от нагрузки, несколько меньше, чем область деформации поверхностей тел [10].

Введём понятие «сближение центров контактирующих тел»:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2, \quad (1.18)$$

где  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – максимальные деформации в центре площадки контакта.

Для герцевского распределения давления деформацию в центре площадки контакта первого шара с использованием решения Буссинеска найдём интегрированием:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{1-\varepsilon_1^2}{\pi \cdot E_1} \cdot \int_0^{a/2} \int_0^{2\pi} \frac{p(r)}{r} r \cdot df \cdot dr = 2 \cdot \frac{1-\varepsilon_1^2}{E_1} \int_0^a p(r) \cdot dr = \frac{1-\varepsilon_1^2}{E_1} \cdot \\ &\cdot \frac{2p_0}{a} \int_0^a \sqrt{a^2 - r^2} dr = \frac{1-\varepsilon_1^2}{E_1} \cdot \frac{2p_0}{a} \cdot \frac{\pi}{4} a^2 = \frac{1-\varepsilon_1^2}{E_1} \cdot \frac{\pi}{2} p_0 \cdot a. \end{aligned} \quad (1.19)$$

Аналогично получим

$$\delta_2 = \frac{1-\varepsilon_2^2}{E_2} \cdot \frac{\pi}{2} p_0 \cdot a. \quad (1.20)$$

Тогда

$$\delta = \left( \frac{1-\varepsilon_1^2}{E_1} + \frac{1-\varepsilon_2^2}{E_2} \right) \frac{\pi}{2} p_0 \cdot a. \quad (1.21)$$

Введем понятие «приведенный модуль упругости»:

$$E_{np} = \frac{2}{\frac{1-\varepsilon_1^2}{E_1} + \frac{1-\varepsilon_2^2}{E_2}}. \quad (1.22)$$

Тогда получим

$$\delta = \frac{\pi \cdot a \cdot p_0}{E_{np}}. \quad (1.23)$$

Из геометрических соотношений имеем:

$$\delta_1 + \delta_2 = h(a_0) = \frac{a_0^2}{2 \cdot p_{np}}. \quad (1.24)$$

Принимая, что  $a_0 = k \cdot a$ , получим

$$\frac{\pi \cdot a \cdot p_0}{E_{np}} = \frac{k^2 \cdot a^2}{2 \cdot p_{np}}. \quad (1.25)$$

Тогда

$$a = \frac{2 \cdot \pi \cdot p_{np}}{k^2 \cdot E_{np}}. \quad (1.26)$$

Так как

$$p_0 = \frac{3 \cdot F_n}{2 \cdot \pi \cdot a^2}, \quad (1.27)$$

то найдем

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_n \cdot p_{np}}{k^2 \cdot E_{np}}}. \quad (1.28)$$

Точное решение дает выражение:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_n \cdot p_{np}}{2 \cdot E_{np}}}, \quad (1.29)$$

и с учетом этого получим:

$$p_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_n \cdot E_{np}^2}{2 \cdot p_{np}^2}}, \quad (1.30)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{9 \cdot F_n^2}{4 \cdot p_{np} \cdot E_{np}^2}}. \quad (1.31)$$

### Пример расчета

Исходные данные:  $p_1 = 8$  мм,  $p_2 = 6$  мм,  $E_{np} = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $F_n = 50 \cdot 10^{-9}$  Н.

$$p_{np} = \frac{0,008 \cdot 0,006}{0,008 - 0,006} = 0,024 \text{ м.}$$

$$p_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 50 \cdot 10^{-9} \cdot (2 \cdot 10^{11})^2}{2 \cdot 0,024^2}} \approx 5,5 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{9 \cdot (50 \cdot 10^{-9})^2}{4 \cdot 0,024 \cdot (2 \cdot 10^{11})^2}} \approx 2,42 \cdot 10^{-18} \text{ м.}$$

## **Порядок выполнения работы**

1. Определите геометрические параметры сфер и физико-механические константы материалов сфер.
2. Произведите расчет приведенного радиуса кривизны в контакте.
3. Произведите расчет деформаций поверхности.
4. Произведите расчет максимального давления в центре площадки контакта.
5. Оформите отчет по работе.

## **Контрольные вопросы**

1. Как распределяется давление в зоне контакта двух сфер?
2. Дайте определение упругого полупространства.
3. Какие допущения были приняты Герцем?
4. Запишите формулу для определения деформаций поверхности.
5. Запишите формулу для определения максимального давления в центре площадки контакта.
6. Запишите формулу для определения полной нормальной нагрузки.
7. От каких параметров зависит величина деформаций поверхности?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

#### **Цель работы**

1. Ознакомить обучающихся с факторами, влияющими на величину коэффициента трения качения.
2. Ознакомить обучающихся с методом расчета коэффициента трения качения.
3. Привить обучающимся навыки определения коэффициента трения качения на основе решения уравнений плоской задачи теории упругости.

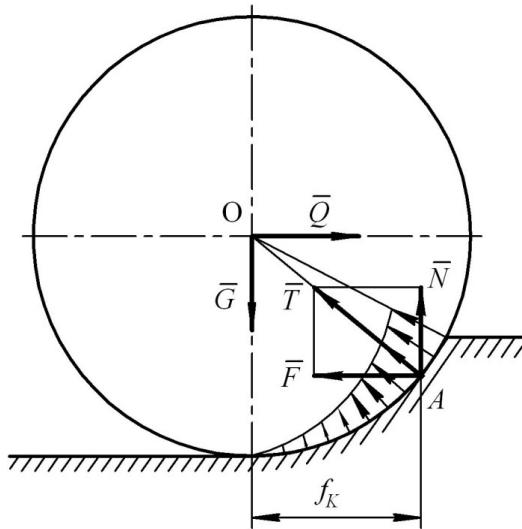
#### **Теоретические сведения**

В большинстве случаев трение качения описывается качественной схемой, которая поясняет причину появления сопротивления качению одного тела по поверхности другого. По этой схеме сопротивление качению появляется вследствие деформации поверхностей. При стремлении сдвинуть, например, цилиндр (каток) вдоль опорной поверхности возникают силы реакции поверхности в зоне ее деформации, равнодействующая которых  $T$  обуславливает появление момента, препятствующего качению катка. Сдвиг точки  $A$  приложения этой равнодействующей относительно вертикальной оси катка в момент начала движения представляет собой величину коэффициента трения качения (рис. 2.1).

Коэффициент трения качения определяется опытным путем для различных пар материалов и приводится в справочниках. В этих данных учитываются только виды взаимодействующих материалов (т. е. в неявном виде физические свойства материалов и неизвестные условия экспериментов), данных о влиянии на коэффициент трения размеров катков или колес и величины нагрузок нет [11, 24].

Представляется несомненным, что величина нагрузки  $G$  и изменение радиуса колес должны влиять на величину зоны деформации поверхности в направлении движения. То есть можно ожидать и влияния этих параметров на коэффициент трения качения.

В. З. Павловым предложена математическая модель для расчета коэффициента трения качения с учетом размеров тела и нагрузок. Для упрощения им было принято, что каток является более жестким телом, и его деформация мала по сравнению с деформацией опорной поверхности. Процесс деформации рассматривался в приближении плоской задачи. Линия деформации опорной поверхности представлялась дугой окружности, и потеря энергии на деформацию катка не было.



**Рис. 2.1.** Схема возникновения трения качения

Линия действия равнодействующей  $T$  сходящихся сил реакций деформированной поверхности проходит через центр тяжести  $C$  эпюры распределения сил реакций  $q(l)$  вдоль линии дуги (рис. 2.2). Деформация поверхности мала по сравнению с размерами катка [11, 24].

Коэффициент трения качения:

$$f_k = R \sin \theta = R \sin \frac{l_c}{R} \approx l_c, \quad (2.1)$$

где  $R$  – радиус катка, м;

$\theta$  – угол, соответствующий положению центра тяжести эпюры;

$l_c$  – дуговая координата центра тяжести эпюры, м.

Интенсивность сил реакций поверхности в момент начала движения:

$$q(l) = \frac{Q}{RB\alpha} \sin \theta, \quad (2.2)$$

где  $Q$  – сила, вызывающая качение катка и направленная параллельно поверхности (или горизонтальная составляющая равнодействующей приложенных сил), Н;

$B$  – длина катка, м;

$\alpha$  – угол деформации;

$\theta$  – текущая угловая координата.

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)