

## Экспериментальное задание 7

### Изучение равновесия тел под действием нескольких сил

**Цель работы:** экспериментально установить соотношение между силами, действующими на рычаг, и плечами этих сил, при котором рычаг находится в равновесии; проверить справедливость правила моментов сил.

**Оборудование:** рычаг с балансиrom, груз 100 г (4 шт.), стержень штатива с муфтой, динамометр, линейка.

#### Краткая теория

Основным признаком взаимодействия тел в динамике является возникновение ускорений. Однако часто бывает нужно знать, при каких условиях тело, на которое действует несколько различных сил, не движется с ускорением. Подвесим шар на нити. На шар действует сила тяжести, но не вызывает ускоренного движения к Земле. Этому препятствует действие равной по модулю и направленной в противоположную сторону силы упругости. Сила тяжести и сила упругости уравновешивают друг друга, их равнодействующая равна нулю, поэтому равно нулю и ускорение шара (рис. 1).



Рис. 1

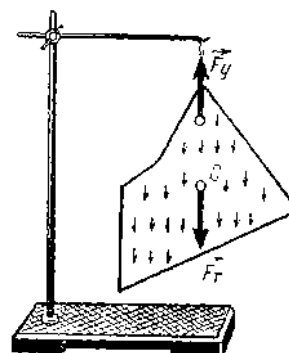


Рис. 2

Точку, через которую проходит равнодействующая сил тяжести при любом расположении тела, называют центром тяжести (рис. 2). Раздел механики, изучающий условия равновесия сил, называется *статикой*.

Абсолютно твердым телом называют тело, расстоянием между любыми двумя точками которого неизменно.

**Равновесие невращающихся тел.** Равномерное прямолинейное поступательное движение тела или его покой возможны только при равенстве нулю геометрической суммы всех сил, приложенных к телу. Таким образом, невращающееся тело находится в равновесии, если геометрическая сумма сил, приложенных к телу, равна нулю.

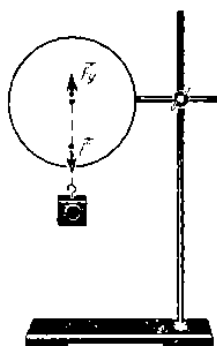


Рис. 3

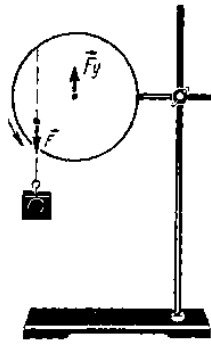


Рис. 4

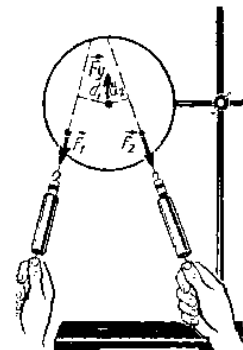


Рис. 5

Первое условие равновесия твердого тела: если его тело находится в равновесии, то геометрическая сумма внешних сил, приложенных к нему, равна нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n = \vec{0} \quad (1)$$

**Равновесие тел, имеющих ось вращения.** В повседневной жизни и технике часто

встречаются тела, которые не могут двигаться поступательно, но могут вращаться вокруг оси. Примерами таких тел могут служить двери и окна, колеса автомобиля, качели и т. д. Если вектор силы  $\vec{F}$  лежит на прямой, пересекающей ось вращения, то эта сила уравновешивается силой упругости  $\vec{F}_{упр}$  со стороны оси вращения (рис. 3).

Если же прямая, на которой лежит вектор силы  $\vec{F}$ , не пересекает ось вращения, то эта сила не может быть уравновешена силой упругости со стороны оси вращения, и тело поворачивается вокруг оси (рис. 4).

Вращение тела вокруг оси под действием одной силы  $\vec{F}_1$  может быть остановлено действием второй силы  $\vec{F}_2$ . Опыт показывает, что если две силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  по отдельности вызывают вращение тела в противоположных направлениях, то при их одновременном действии тело находится в равновесии, если выполняется условие:

$$F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2 \quad (2)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  — кратчайшие расстояния от прямых, на которых лежат векторы сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  (линии действия сил), до оси вращения (рис. 5). Длину перпендикуляра  $d$ , опущенного из оси вращения на линию действия силы, называют *плечом силы*.

Моментом силы относительно оси вращения тела называется взятое со знаком «плюс» или «минус» произведение модуля силы на ее плечо.

Момент силы  $\vec{F}$  обозначается буквой  $M$ :

$$M = \pm F \cdot d \quad (3)$$

Будем считать момент силы  $\vec{F}$  положительным, если в отсутствие других сил она может вызвать поворот тела против часовой стрелки, и отрицательным, если  $\vec{F}$  при тех же условиях может повернуть тело по часовой стрелке.

За единицу вращающего момента в СИ принимается момент силы в 1 Н, линия действия которой находится на расстоянии 1 м от оси вращения. Эту единицу называют *ньютон-метром* ( $H \cdot m$ ).

Второе условие равновесия твердого тела: при равновесии твердого тела сумма моментов всех внешних сил, действующих на него относительно любой оси, равна нулю:

$$M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_n = 0 \quad (4)$$

**Общее условие равновесия тела.** Объединяя два вывода, можно сформулировать общее условие равновесия тела: *тело находится в равновесии, если равны нулю геометрическая сумма векторов всех приложенных к нему сил и алгебраическая сумма моментов этих сил относительно оси вращения.*

При выполнении общего условия равновесия тело необязательно находится в покое. Согласно второму закону Ньютона при равенстве нулю равнодействующей всех сил ускорение тела равно нулю, и оно может находиться в покое или двигаться равномерно и прямолинейно.

Равенство нулю алгебраической суммы моментов сил не означает также, что при этом тело обязательно находится в покое. На протяжении нескольких миллиардов лет с постоянным периодом продолжается вращение Земли вокруг оси именно потому, что алгебраическая сумма моментов сил, действующих на Землю со стороны других тел, очень мала. По той же причине продолжает вращение с постоянной частотой раскрученное велосипедное колесо, и только внешние силы останавливают это вращение.

Два условия равновесия твердого тела являются необходимыми и достаточными для равновесия твердого тела. Если же тело не абсолютно твердое, то под действием приложенных к нему внешних сил оно может и не находиться в

равновесии, хотя сумма внешних сил и сумма их моментов относительно любой оси равна нулю. Это происходит, потому что под действием внешних сил тело может деформироваться и сумма всех сил, действующих на каждый его элемент, в этом случае не будут равна нулю.

Приложим, например, к концам резинового шнура две силы, равные по модулю и направленные вдоль шнура в противоположные стороны. Под действием этих сил шнур не будет находиться в равновесии (шнур растягивается), хотя сумма внешних сил равна нулю и равна нулю сумма их моментов относительно оси, проходящей через любую точку шнура.

**Виды равновесия.** В практике большую роль играет не только выполнение условия равновесия тел, но и качественная характеристика равновесия, называемая *устойчивостью*. Различают три вида равновесия тел:

- устойчивое,
- неустойчивое
- безразличное.

Равновесие называется устойчивым, если после небольших внешних воздействий тело возвращается в исходное состояние равновесия. Это происходит, если при небольшом смещении тела в любом направлении от первоначального положения равнодействующая сил, действующих на тело, становится отличной от нуля и направлена к положению равновесия. В устойчивом равновесии находится, например, шар на дне углубления (рис. 6).

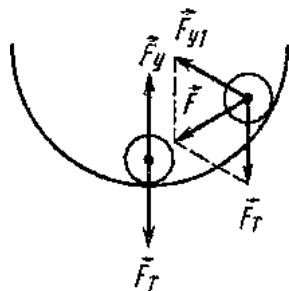


Рис. 6

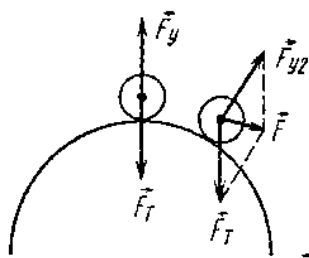


Рис. 7

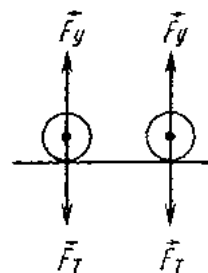


Рис. 8

Равновесие называется неустойчивым, если при небольшом смещении тела из положения равновесия равнодействующая приложенных к нему сил отлична от нуля и направлена от положения равновесия (рис. 7).

Если при небольших смещениях тела из первоначального положения равнодействующая приложенных к телу сил остается равной нулю, то тело находится в состоянии безразличного равновесия. В безразличном равновесии находится шар на горизонтальной поверхности (рис. 8).

Тело, имеющее неподвижную ось вращения, находится в устойчивом равновесии, если его центр тяжести расположен ниже оси вращения и находится на вертикальной прямой, проходящей через ось вращения (рис. 9, а).

При небольшом отклонении от этого положения равновесия алгебраическая сумма моментов сил, действующих на тело, становится отличной от нуля, и возникающий момент сил поворачивает тело к первоначальному положению равновесия (рис. 9, б).

Если же центр тяжести находится на вертикальной прямой, проходящей через ось вращения, но расположен выше оси вращения, то равновесие неустойчивое (рис. 10, а, б).

Тело находится в безразличном равновесии, когда ось вращения тела проходит через его центр тяжести (рис. 11).

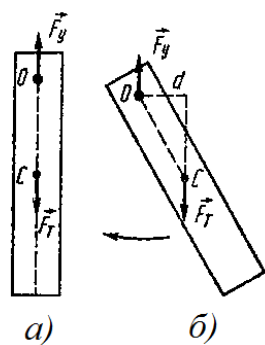


Рис. 9

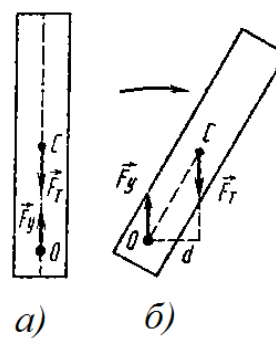


Рис. 10

**Равновесие тела на опоре.** Если вертикальная линия, проведенная через центр тяжести  $C$  тела, пересекает площадь опоры, то тело находится в равновесии (рис. 12). Если же вертикальная линия, проведенная через центр тяжести, не пересекает площадь опоры, то тело опрокидывается (рис. 13).

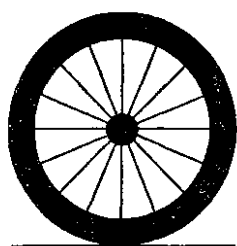


Рис. 11

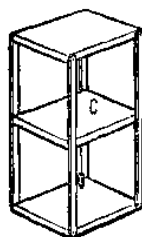


Рис. 12

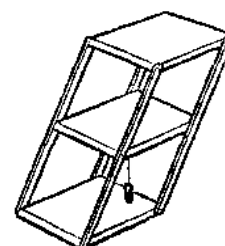


Рис. 13

### I. Описание экспериментальной установки

Работа предназначена для формирования более целостного представления о действии рычага и разновидностях его конструкции. Работа состоит из двух частей. В первой части экспериментально подтверждается условие равновесия рычага, а во второй части – второе условие равновесия. Перед началом выполнения работы внимательно прочитайте ход работы.

1. Соберите экспериментальную установку.

Из укладочного пенала извлекают необходимое для работы оборудование, крышку пенала устанавливают на место.

Рычаг прикрепляют крепежным винтом муфты к штативу, как и предусмотрено его конструкцией. Вид этой установки показан на рисунке 14. Убедитесь в том, что рычаг может вращаться вокруг оси без заметного трения.

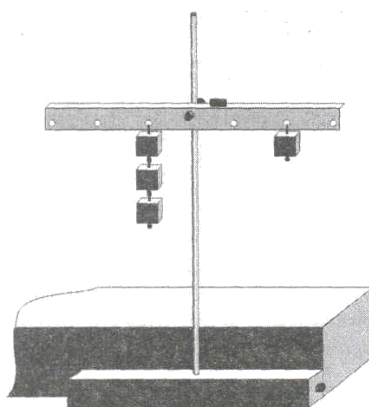


Рис. 14

Перемещая ползунок вдоль рычага, найдите такое положение, при котором рычаг располагался бы на оси горизонтально. (Балансиром рычаг приводят в равновесие.).

Затем слева и справа от оси к рычагу подвешивают грузы, а отверстия для подвеса грузов выбирают так, чтобы рычаг оставался в равновесии. На каждой из сторон грузы должны быть повешены только к одному отверстию. Результаты опыта заносят в таблицу.

## 2. Ход работы.

Для записи результатов измерений и вычислений подготовьте таблицу 1.

Таблица 1

№ опыта	$F_1, Н$	$l_1, см$	$M_1, Н \cdot м$	$F_2, Н$	$l_2, см$	$M_2, Н \cdot м$	$\frac{F_1}{F_2}$	$\frac{l_2}{l_1}$
1								
2								
3								
4								
5								

В таблице 1 обозначено:

$F_1$  - сила, стремящаяся вращать рычаг против часовой стрелки;

$F_2$  - сила, стремящаяся, вращать рычаг по часовой стрелке;

$l_1$  - плечо силы  $F_1$ ;

$l_2$  - плечо силы  $F_2$ .

2. К правой части рычага подвесьте два груза, используя для подвеса второе отверстие, справа от оси (рис. 15).

К левой части рычага подвесьте два груза. Место подвески этого груза определите экспериментально так, чтобы рычаг сохранил равновесие.

С помощью линейки измерьте плечи сил.

Занесите данные первого опыта в первую строчку таблицы 1. При этом нужно учесть, что сила, стремящаяся вращать рычаг, равна весу грузов, которые подвешены. Вес грузов определяют с помощью динамометра.

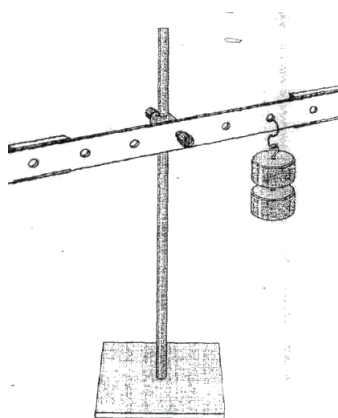


Рис. 15

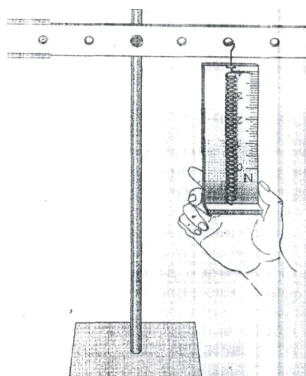


Рис. 16

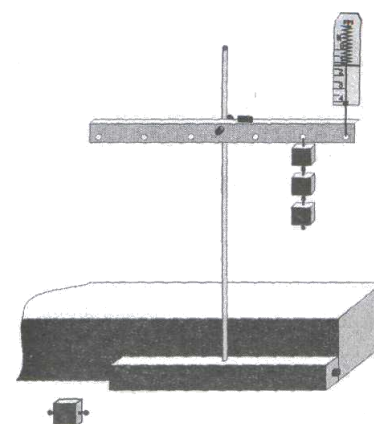


Рис. 17

3. К левой части рычага к первому отверстию от оси подвесьте три груза. К правой части рычага подвесьте один груз, выбрав место их подвески так, чтобы равновесие

рычага сохранилось.

Определите плечи и величины сил, приложенных к рычагу в этом опыте. Данные занесите во вторую строчку таблицы 1.

4. Повторите опыт, оставив без изменения плечо силы, а количество грузов уменьшите до одного. Сколько грузов и куда их надо подвесить к правой части рычага, чтобы равновесие рычага сохранилось.

Определите плечи и величины сил, приложенных к рычагу в третьем опыте. Данные занесите в третью строчку таблицы 1.4. К левой части рычага подвесьте два груза, используя для подвеса третье отверстие.

Прикрепите динамометр ко второму отверстию справа от оси, как показано на рисунке 16, и, потянув за него вниз, верните рычаг в исходное положение.

По показанию динамометра определите величину силы  $F$ , которую необходимо было приложить к рычагу, чтобы вернуть его в равновесие.

Измерьте линейкой плечи сил, приложенных к рычагу со стороны грузов и динамометра.

Определите плечи и величины сил, приложенных к рычагу в четвертом опыте. Данные занесите в четвертую строчку таблицы 1.

5. Затем силы прикладывают к одной из сторон рычага. Ко второму отверстию справа прикладывают три груза, а динамометр прикрепляют к третьему отверстию, как показано на рисунке 17.

По показанию динамометра определите величину силы  $F$ , которую необходимо было приложить к рычагу, чтобы вернуть его в равновесие.

Измерьте линейкой плечи сил, приложенных к рычагу со стороны грузов и динамометра

Определите плечи и величины сил, приложенных к рычагу в пятом опыте. Данные занесите в пятую строчку таблицы 1.

6. Для каждого опыта вычислите отношение сил  $\frac{F_1}{F_2}$ , прилагавшихся к рычагу и отношение их плеч  $\frac{l_2}{l_1}$ .

7. Сделайте вывод о том, в каком отношении должны находиться приложенные к рычагу силы и их плечи, чтобы он находился в равновесии.

8. Для каждого опыта вычислите величины моментов сил  $M_1$  и  $M_2$  по формулам:

$$M_1 = F_1 \cdot l_1 \quad (5)$$

$$M_2 = F_2 \cdot l_2 \quad (6)$$

и результаты занесите в таблицу 1.

9. Сравните величины моментов сил, приложенных к рычагу против и по часовой стрелке в каждом опыте, сделайте вывод о справедливости утверждения, которое необходимо было проверить в работе.

### Контрольные вопросы

1. Почему длинный стержень легче держать в горизонтальном положении за его середину, чем за один из его концов?
2. При каком равновесии твердого тела возможны его свободные колебания?
3. При каком положении уровня воды в цилиндрическом стакане центр тяжести стакана с водой занимает наинизшее положение?