

## Тема 9. Силовые характеристики тела

Силовое воздействие приводит к изменению движения или деформации.

Сила – это векторная физическая величина, которая является мерой взаимодействия тел. Силу обозначают буквой  $F$  ( $\vec{F}$ ). Единица силы – ньютон (Н). Сила  $F$  равна произведению массы тела ( $m$ ) на ускорение ( $a$ ), которое получило тело под действием этой силы:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Сила определяется:

1. величиной (модулем);
2. направлением в пространстве;
3. точкой приложения.

Обычно на тело действует не одна сила, а несколько, поэтому используют понятие равнодействующей силы, то есть силы, которая производит на тело такое же действие, как все приложенные к телу силы:  
 $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \dots$  (рисунок 9.1).

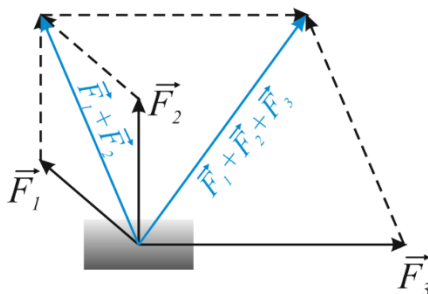


Рисунок 9.1 – Равнодействующая сила  $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \dots$

## Виды сил

### Сила гравитационного взаимодействия:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – это массы взаимодействующих тел,

$r$  – это расстояние между телами,

$G$  – это гравитационная постоянная,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$ .

Силы гравитационного взаимодействия направлены вдоль линии, которая соединяет центры масс тел (рисунок 9.2).

Для тела, которое находится над поверхностью Земли:

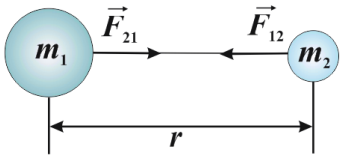
$$F = G \frac{mM}{(R + h)^2},$$

где  $m$  – масса тела,

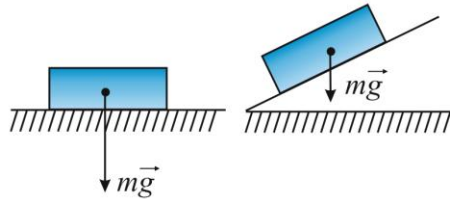
$M$  – масса Земли (примерно  $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ ),

$R$  – радиус Земли (примерно 6400 км),

$h$  – расстояние от поверхности Земли до тела.



а)



б)

Рисунок 9.2 – Гравитационное взаимодействие (а) и сила тяжести (б)

**Сила тяжести** – это сила гравитации, с которой Земля притягивает к себе тела, находящиеся на поверхности:

$$\vec{F}_T = m\vec{g},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ). Сила тяжести приложена к центру масс тела и направлена к центру Земли (рисунок 9.2 б).

**Вес тела** – это сила, с которой тело действует на горизонтальную опору или подвес:

$$\vec{P} = m\vec{g},$$

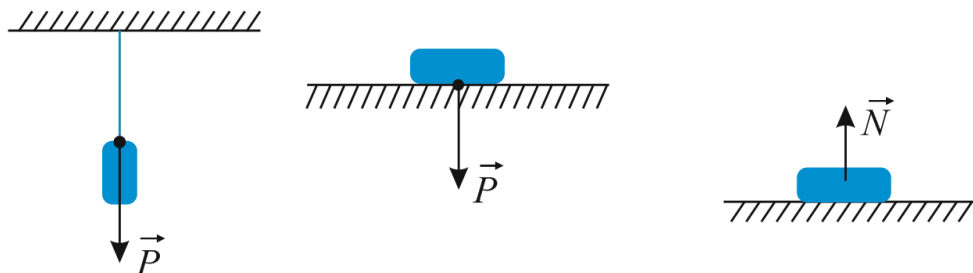
$m$  – масса тела,

$g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ). Вес тела направлен вертикально вниз и приложен к точке опоры (рисунок 9.3 а).

**Сила реакции опоры (сила давления)** – это сила, с которой опора или подвес действуют на тело. Она равна по модулю весу тела и направлена под углом  $90^\circ$  к поверхности:

$$\vec{N} = m\vec{g}.$$

Сила реакции опоры приложена к поверхности соприкасающихся тел (рисунок 9.3 б).



а)

б)

Рисунок 9.3 – Вес тела (а) и сила реакции опоры (б)

**Сила упругости** – это сила, которая возникает при деформации тела и стремится вернуть тело в начальное состояние. Деформация – это изменение формы или объёма тела под действием внешних сил. Бывает деформация сжатия, растяжения, сдвига, кручения и изгиба (рисунок 9.4).

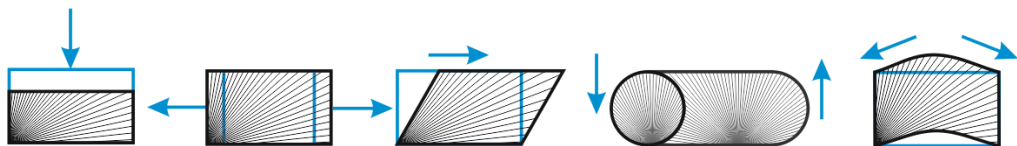


Рисунок 9.4 – Виды деформации

Сила упругости прямо пропорциональна удлинению тела и направлена противоположно силе внешнего воздействия (закон Гука) (рисунок 9.5):

$$\vec{F}_{\text{упр}} = -kx,$$

где  $k$  – это коэффициент жёсткости (Н/м),

$x$  – это изменение длины при деформации тела (удлинение) (м).

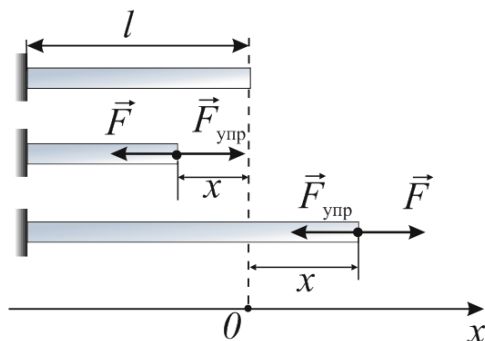


Рисунок 9.5 – Сила упругости

Знак минус означает, что сила упругости всегда направлена против внешней силы и при решении задач может не писаться, так как учитывается при переходе от векторных величин сил к скалярным.

Механическое напряжение – это мера внутренних сил, которые возникают при деформации тела. Напряжение (поверхностная сила, поверхностная нагрузка) – это нагрузка, отнесённая к единице площади:

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

где  $F$  – это модуль силы, которая вызывает деформацию,

$S$  – это площадь поперечного сечения тела.

Механическое напряжение – это скалярная физическая величина, которая измеряется в единицах давления. Растягивающее напряжение считают положительным, а сжимающее – отрицательным.

В качестве меры деформации используют относительное удлинение:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l},$$

где  $l$  – это начальная длина стержня,

$\Delta l$  – это удлинение стержня.

Закон Гука можно записать в виде:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где  $E$  – это модуль Юнга, который зависит от материала стержня,

$\varepsilon$  – это относительное удлинение стержня.

Механическое напряжение возникает в теле человека, например, при подъёме груза или повторяющихся нагрузках. Механическое напряжение в мышце возникает при её сокращении. Чем больше возбуждена мышца, тем больше величина механического напряжения.

Значения модуля упругости представлены в таблице 3:

Таблица 3. Модуль упругости некоторых тел

Кость	$2 \cdot 10^9$ МПа	Сталь	$2 \cdot 10^{11}$ МПа
Артерия	$5 \cdot 10^4$ МПа	Дерево	$12 \cdot 10^9$ МПа
Мышца в покое	$9 \cdot 10^5$ МПа	Резина	$5 \cdot 10^6$ МПа

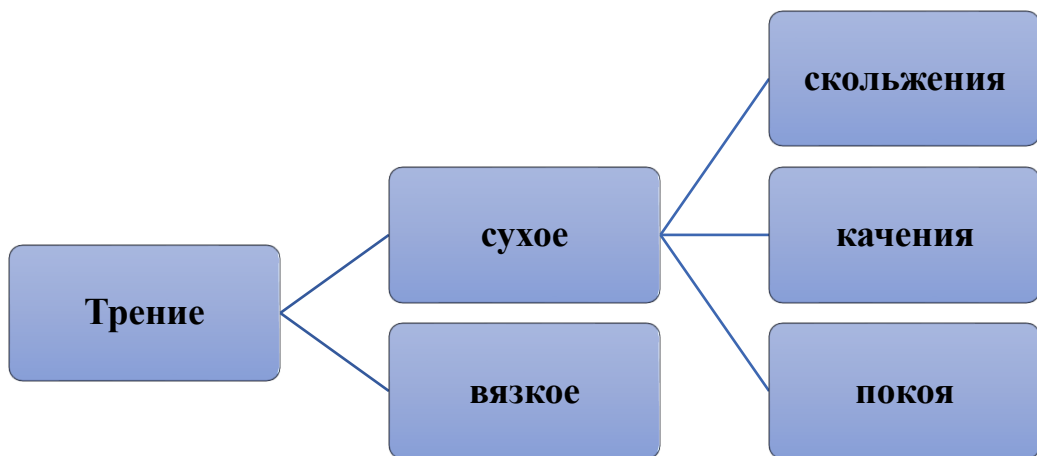
**Сила трения** – это сила, которая возникает при движении одного тела по поверхности другого тела:

$$\vec{F}_{\text{тр}} = \mu \vec{N},$$

где  $\mu$  – это коэффициент трения, его определяют из эксперимента.

Показывает, насколько поверхность гладкая,

$N$  – это сила нормальной реакции опоры.



Сила трения направлена против движения (скорости тела) и приложена к поверхности движущегося тела. Виды сил сухого трения: скольжения, покоя, качения (рисунок 9.6).

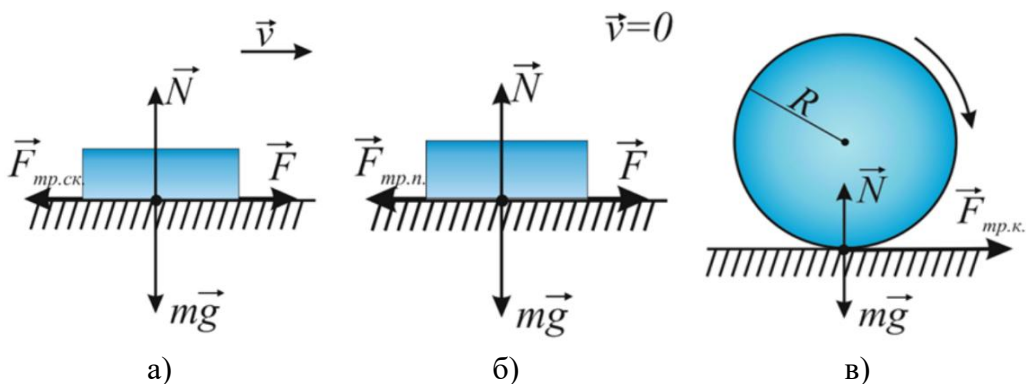


Рисунок 9.6 – Виды сил трения: скольжения (а), покоя (б), качения (в)

Сила трения скольжения прямо пропорциональна силе реакции опоры и коэффициенту трения скольжения:

$$\vec{F}_{\text{тр}} = \mu \vec{N},$$

где  $\mu$  – это коэффициент трения, его определяют из эксперимента. Показывает, насколько поверхность гладкая,

$N$  – это сила нормальной реакции опоры.

Сила трения покоя – это сила, которая возникает между неподвижными телами, на одно из которых действует внешняя сила, не приводящая к началу движения:

$$F_{\text{тр.п.}} = F_{\text{тяги}},$$

где  $F_{\text{тр.п.}}$  – это сила трения покоя,

$F_{\text{тяги}}$  – это сила, приложенная к телу.

Сила трения качения – это сила, которая возникает, когда одно тело катится по поверхности другого тела:

$$F_{\text{тр.к.}} = \frac{\lambda N}{R},$$

где  $\lambda$  – это коэффициент трения качения,

$N$  – это сила реакции опоры,

$R$  – это радиус колеса.

Сила трения качения всегда меньше сила трения скольжения, поэтому колесо используют не только в различных видах транспорта, но и в устройствах, облегчающих приложенные усилия.

Сила вязкого трения – это сила, которая возникает при движении твёрдого тела в жидкости или газе. Сила вязкого трения направлена противоположно направлению скорости. При вязком трении нет трения покоя. Сила вязкого трения всегда меньше силы сухого трения и зависит от формы тела:

$$F = \eta S \frac{v}{d},$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости ( $\text{Па} \cdot \text{с}$ ),

$S$  – площадь взаимодействующих слоёв ( $\text{м}^2$ ),

$v$  – скорость движения одного слоя относительно другого ( $\text{м/с}$ ),

$d$  – расстояние между слоями ( $\text{м}$ )

При малых скоростях  $F \sim v$ , а при больших –  $F \sim v^2$ . Коэффициент вязкости зависит от температуры и агрегатного состояния вещества (таблица 4):

Таблица 4. Зависимость коэффициента вязкости от температуры и агрегатного состояния

Вещество	Вода		Воздух	
Температура	0°C	60°C	0°C	60°C
Плотность	1000 кг/м <sup>3</sup>	983 кг/м <sup>3</sup>	1,3 кг/м <sup>3</sup>	1,06 кг/м <sup>3</sup>
Вязкость	1788 · 10 <sup>6</sup> Па · с	470 · 10 <sup>6</sup> Па · с	17,2 · 10 <sup>6</sup> Па · с	20,1 · 10 <sup>6</sup> Па · с

**Сила Архимеда** (выталкивающая сила) – это сила, которая действует на любое тело, находящееся в жидкости или газе:

$$F_A = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{т}},$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости (или газа), в которой находится тело,

$g$  – ускорение свободного падения,

$V_{\text{т}}$  – объём тела или его части, которая находится в жидкости.

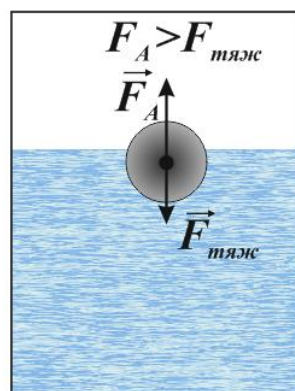
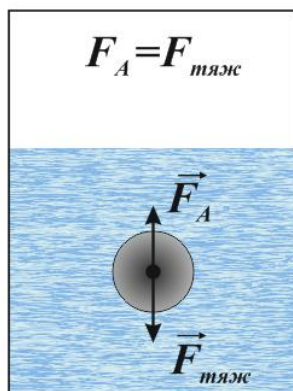
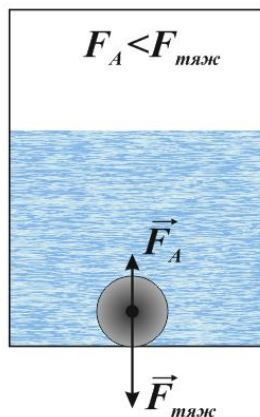
Сила Архимеда (выталкивающая сила) приложена к центру тяжести (масс) тела и направлена противоположно силе тяжести – вертикально вверх.

#### Условия плавания тел:

Тело тонет

Тело плавает

Тело всплывает



Плотность жидкости  
меньше плотности  
тела

Плотность жидкости  
равна плотности тела

Плотность жидкости  
больше плотности тела