



§ 17.

Второй закон Ньютона — основной закон динамики

Первый закон Ньютона отвечает на вопрос: «Как ведет себя тело, если на него действуют силы, которые компенсируют друг друга?» А что будет с телом, если силы не скомпенсированы? На этот вопрос дает ответ второй закон Ньютона.

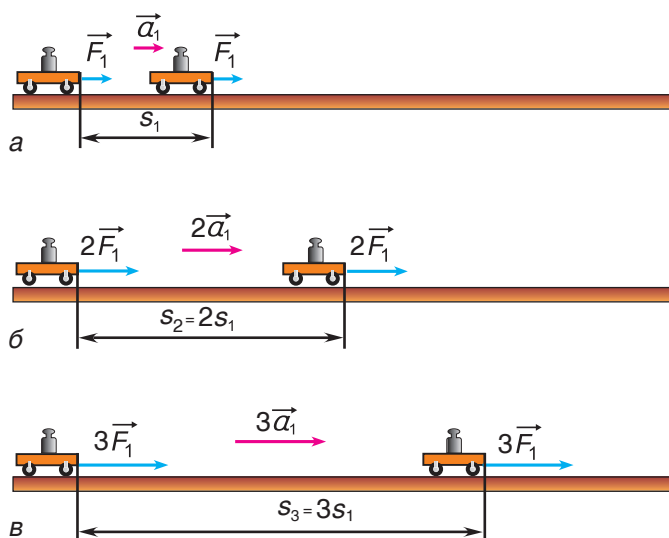


Рис. 107

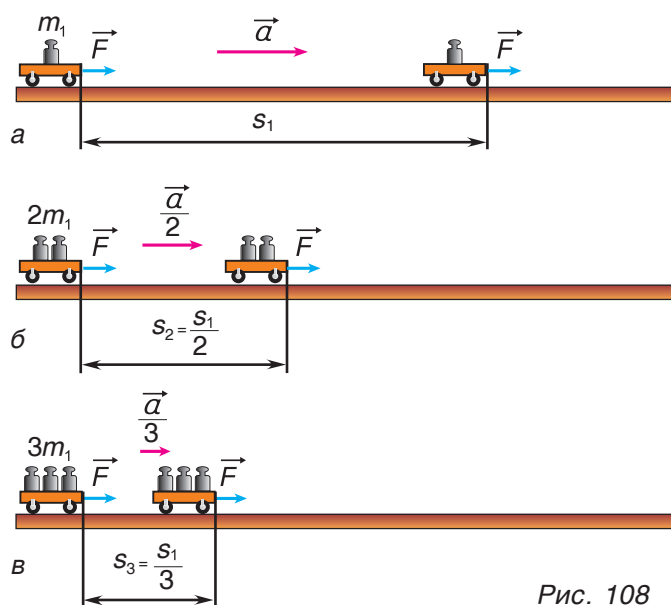


Рис. 108

Рассмотрим опыт. Приложим силу $\vec{F}_1$ к тележке, находящейся на гладкой горизонтальной поверхности (рис. 107, а). Кроме силы $\vec{F}_1$, на тележку действуют сила тяжести и реакция опоры (на рисунке они не показаны), которые компенсируют друг друга. Силой трения качения можно пренебречь. Поэтому сила $\vec{F}_1$ равна результирующей всех сил, приложенных к тележке. Под действием силы $\vec{F}_1$ тележка приобретает ускорение $\vec{a}_1$.

Ускорение тележки будем определять по формуле $a = \frac{2s}{t^2}$, пройденный путь s измерять рулеткой, время t — секундомером, силу F — динамометром. Как связано ускорение с приложенной к тележке результирующей силой?

Увеличим силу в два раза ($\vec{F}_2 = 2\vec{F}_1$) (рис. 107, б). За такое же время t тележка пройдет путь, в 2 раза больший: $s_2 = 2s_1$. Значит, $a_2 = 2a_1$, т. е. в два раза бóльшая сила сообщает телу в два раза большее ускорение. Продолжив опыты, получим, что при увеличении результирующей силы в 3, 4, ... раза модуль ускорения a увеличится тоже в 3, 4, ... раза. Сделаем вывод.

Ускорение тела прямо пропорционально результирующей всех сил, приложенных к нему:

$$\vec{a} \sim \vec{F}. \quad (1)$$

А как зависит ускорение от **массы** тела? Будем теперь силу $\vec{F}$ прикладывать к телам разных масс (рис. 108, а, б, в). Под действием одной и той же силы тело в 2 раза большей массы приобретет в 2 раза меньшее ускорение. Ускоряя тела в 3, 4, ... раза большей массы, мы увидим, что модуль ускорения в 3, 4, ... раза уменьшится.

Модули ускорений, приобретаемых телами под действием одинаковых сил, обратно пропорциональны массам этих тел:

$$a \sim \frac{1}{m}. \quad (2)$$

А как направлено ускорение? В нашем опыте направления ускорения $\vec{a}$ и силы $\vec{F}$ совпадали (рис. 108). Рассмотрим еще два примера.

1. К тележке приложили силу $\vec{F}$, направленную против ее скорости $\vec{v}$ (рис. 109, а). Скорость тележки будет уменьшаться, и ее ускорение $\vec{a}$ будет направлено противоположно скорости, но так же, как и результирующая сила $\vec{F}$.

2. Шарик, подвешенный на нити, движется по окружности (рис. 109, б). Ускорение шарика направлено к ее центру O . Опыт показывает, что и в этом случае направления ускорения $\vec{a}$ и результирующей $\vec{F}$ всех сил, приложенных к телу (силы тяжести $\vec{F}_T$ и силы натяжения нити $\vec{F}_H$), совпадают.

В итоге приходим к выводу.

Ускорение тела прямо пропорционально результирующей всех сил, приложенных к нему, обратно пропорционально массе тела и направлено так же, как результирующая сила:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (3)$$

Это основной закон динамики — **второй закон Ньютона**. Из формулы (3) следует, что направления ускорения $\vec{a}$ и результирующей силы $\vec{F}$ совпадают.

Запишем второй закон Ньютона в виде:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (4)$$

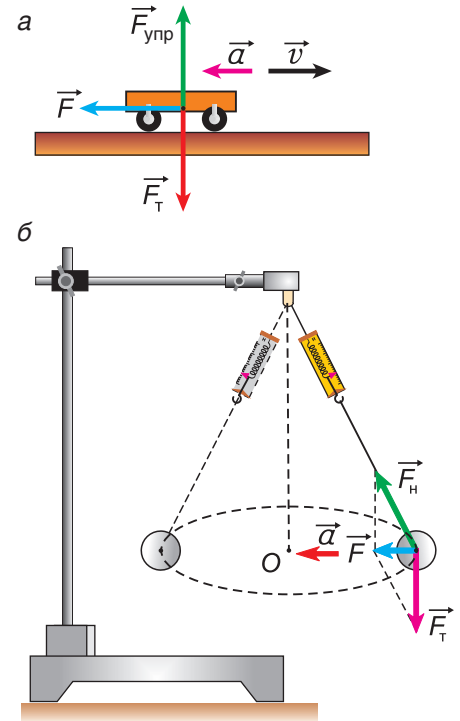


Рис. 109

В соответствии с формулой (4) определяется единица силы в СИ — ньютон (Н).

1 Н — сила, под действием которой тело массой 1 кг приобретает ускорение $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

В каких системах отсчета выполняется второй закон Ньютона?

В § 15 мы выяснили, что если система неинерциальна, то при результирующей $\vec{F} = \vec{0}$ ускорение тела $\vec{a} \neq \vec{0}$. Но согласно второму закону Ньютона при $\vec{F} = \vec{0}$ ускорение $\vec{a}$ должно быть равно нулю. Значит, *второй закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчета.*

А как применять формулу (4), если тело нельзя рассматривать как материальную точку? В таких случаях под ускорением $\vec{a}$ следует понимать ускорение точки, называемой *центром тяжести* этого тела. Понятие «центр тяжести» мы рассмотрим в следующем разделе.

Главные выводы

1. Ускорение тела прямо пропорционально результирующей всех сил, действующих на него, и обратно пропорционально массе тела.
2. Ускорение тела направлено так же, как результирующая всех приложенных к нему сил.
3. Единица силы в СИ — 1 ньютон. Это сила, под действием которой тело массой 1 кг движется с ускорением $1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.
4. Второй закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчета.

Контрольные вопросы

1. Как направлено ускорение по отношению к силам, действующим на тело?
2. Как найти модуль ускорения, если на тело действует несколько сил?
3. Куда направлена результирующая приложенных к телу сил, если оно движется по окружности с постоянным модулем скорости?
4. Как определяется единица силы в СИ? Как это согласуется с определением силы 1 Н, которое вы изучали в 7-м классе?



Примеры решения задач

1. Сани массой $m = 120$ кг тянут по горизонтальному участку пути, прикладывая силу $\vec{F}$ под углом $\alpha = 45^\circ$ к горизонту. Модуль силы $F = 400$ Н. Модуль силы трения скольжения $F_{\text{тр}} = 100$ Н. Определите ускорение саней. Примите $g = 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$.

Дано:

$$m = 120 \text{ кг}$$

$$F = 400 \text{ Н}$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$F_{\text{тр}} = 100 \text{ Н}$$

$$a = ?$$

Решение

Сделаем рисунок к задаче (рис. 110).

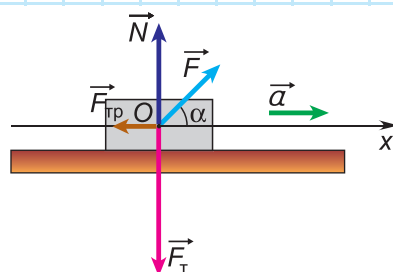


Рис. 110

К саням приложены четыре силы: сила тяжести $\vec{F}_t$, сила реакции опоры $\vec{N}$, сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ и сила $\vec{F}$. По второму закону Ньютона:

$$m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_t + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N}. \quad (1)$$

В проекции на ось Ox уравнение (1) примет вид:

$$ma_x = F_x + F_{tx} + F_{\text{тр}x} + N_x, \quad (2)$$

где $a_x = a$, $F_x = F \cos \alpha$, $F_{tx} = 0$, $F_{\text{тр}x} = -F_{\text{тр}}$, $N_x = 0$.

Тогда из уравнения (2) следует:

$$ma = F \cos \alpha - F_{\text{тр}};$$

$$a = \frac{F \cos \alpha - F_{\text{тр}}}{m} = \frac{400 \text{ Н} \cdot 0,71 - 100 \text{ Н}}{120 \text{ кг}} = 1,53 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Ответ: $a = 1,53 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

2. Два цилиндра — стальной и алюминиевый — одинакового объема подвешены к концам нити, перекинутой через неподвижный блок. Какой путь пройдет каждый цилиндр за время $t = 0,50$ с? Силами сопротивления пренебречь. Блок считать невесомым, нить — невесомой и нерастяжимой. Принять $g = 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$.



Примеры решения задач

Дано:

$$V_1 = V_2$$

$$t = 0,50 \text{ с}$$

$$g = 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$$

$$\rho_{\text{ст}} = 7,8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

$$\rho_{\text{ал}} = 2,7 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

s — ?

Решение

Сделаем рисунок к данной задаче (рис. 111).

На каждую гирю действуют сила тяжести $\vec{F}_T$ и сила натяжения нити $\vec{F}_H$.

Согласно второму закону Ньютона:

$$m_{\text{ст}} \vec{a}_1 = \vec{F}_{T1} + \vec{F}_{H1}; \quad (1)$$

$$m_{\text{ал}} \vec{a}_2 = \vec{F}_{T2} + \vec{F}_{H2}. \quad (2)$$

Модули сил тяжести $F_T = mg$, где m — масса груза. Так как нить нерастяжима, $|\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = a$.

Так как блок и нити невесомы, $|\vec{F}_{H1}| = |\vec{F}_{H2}| = F_H$.

Запишем уравнения (1) и (2) в проекции на вертикальную ось Oy (см. рис. 111):

$$m_{\text{ст}} a = m_{\text{ст}} g - F_H; \quad (3)$$

$$-m_{\text{ал}} a = m_{\text{ал}} g - F_H. \quad (4)$$

Вычтем из уравнения (3) уравнение (4), получим:

$$(m_{\text{ст}} + m_{\text{ал}}) \cdot a = (m_{\text{ст}} - m_{\text{ал}}) \cdot g.$$

Отсюда

$$a = \frac{(m_{\text{ст}} - m_{\text{ал}}) \cdot g}{m_{\text{ст}} + m_{\text{ал}}}.$$

Массы цилиндров:

$$m_{\text{ст}} = \rho_{\text{ст}} \cdot V; \quad m_{\text{ал}} = \rho_{\text{ал}} \cdot V.$$

Тогда

$$a = \frac{(\rho_{\text{ст}} - \rho_{\text{ал}}) \cdot g}{\rho_{\text{ст}} + \rho_{\text{ал}}}.$$

Путь, пройденный каждым из цилиндров:

$$s = \frac{at^2}{2};$$

$$s = \frac{(\rho_{\text{ст}} - \rho_{\text{ал}}) \cdot g \cdot t^2}{2(\rho_{\text{ст}} + \rho_{\text{ал}})} = \frac{5,1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 0,25 \text{ с}^2}{10,5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot 2} = 0,61 \text{ м}.$$

Ответ: $s = 0,61 \text{ м}$.

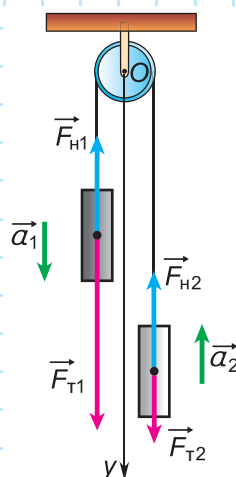


Рис. 111

Упражнение 13

1. На каком физическом явлении основано стряхивание снега с шапки?

2. Тело массой $m = 6,0$ кг перемещают по гладкой горизонтальной поверхности, действуя горизонтальной силой, модуль которой $F = 4,2$ Н. Определите ускорение тела.

3. Ведро с песком массой $m = 20$ кг поднимают вверх с ускорением $a = 2,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, действуя на него вертикально вверх силой $\vec{F}$. Определите модуль силы F . Коэффициент g здесь и в последующих задачах принять равным $10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$.

4. Две гири массами $m_1 = 2,0$ кг и $m_2 = 1,0$ кг подвешены на концах невесомой нерастяжимой нити, перекинутой через невесомый неподвижный блок (рис. 112). Каждая гиря прошла путь $s = 0,80$ м. Определите ускорения гирь и их скорости в конце пути.

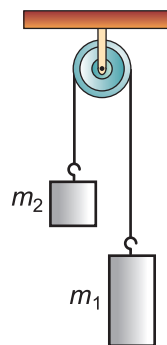


Рис. 112

5. Два груза массами $m_1 = 400$ г и $m_2 = 200$ г связаны невесомой нерастяжимой нитью (рис. 113), рассчитанной на предельную нагрузку $F_{\text{max}} = 8,20$ Н. Определите максимальную силу $\vec{F}$, с которой можно тянуть груз массой m_1 по гладкой горизонтальной поверхности, чтобы нить не порвалась.

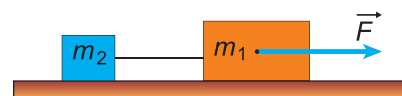


Рис. 113



6. На гладкой наклонной плоскости с углом наклона $\alpha = 30^\circ$ (рис. 114) находится брусок массой $m = 5,0$ кг, на который действует горизонтальная сила, модуль которой $F = 15$ Н. Определите ускорение тела и силу давления тела на плоскость.

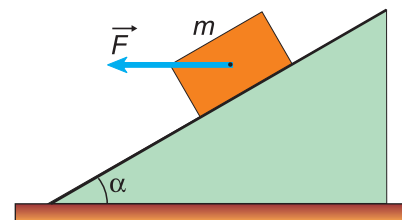


Рис. 114