

Всероссийская школа математики и физики
«Авангард»

Е. Н. ФИЛАТОВ

ФИЗИКА

9

Экспериментальный учебник

Часть 2

*Динамика.
Законы сохранения*

СОДЕРЖАНИЕ

Методические рекомендации 4

Динамика

9. Сила как векторная величина. Равнодействующая сил 13

10. Чем больше сила – тем больше скорость, неправда ли? (Заблуждение, которому больше 2000 лет) 23

11. Первый закон Ньютона 28

12. Второй закон Ньютона 33

13. Третий закон Ньютона 50

14. Вес и невесомость 59

15. Движение тела, брошенного вертикально вверх 70

16. Движение тела, брошенного горизонтально 78

17. Движение тела, брошенного под углом горизонту 86

18. Движение тела по гладкой наклонной плоскости 98

19. Движение тел, связанных легкими нерастяжимыми нитями 105

20. Движение тел по горизонтальной и вертикальной поверхностям с учетом сил трения 126

21. Движение тел по наклонной плоскости с учетом сил трения 151

22. Движение тел с учетом сил сопротивления среды 165

23. Динамика движения по окружности 174

24. Закон всемирного тяготения. Первая космическая скорость 196

Законы сохранения

25. Импульс. Закон сохранения импульса 212

26. Закон сохранения механической энергии 237

Подсказки 277

Ответы 293



13. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Из опыта известно, что силы всегда возникают не в одиночку, а по две сразу: если одно тело действует с некоторой силой на другое (действие), то и второе тело действует с некоторой силой на первое (противодействие). Например, при столкновении двух бильярдных шаров первый действует на второй с некоторой силой $\vec{F}_{12}$, второй на первый – с некоторой силой $\vec{F}_{21}$ (рис. 13.1).

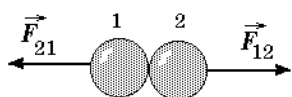


Рис. 13.1

Когда при формировании железнодорожного состава вагоны наталкиваются друг на друга, буферные пружины сжимаются у обоих составов, а значит, между ними возникают силы действия и противодействия.

Земля притягивает Луну (сила всемирного тяготения) и заставляет ее двигаться по криволинейной траектории. В свою очередь Луна также притягивает Землю (тоже сила всемирного тяготения). Опять налицо действие и противодействие.

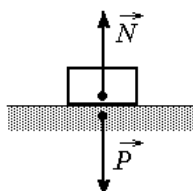


Рис. 13.2

Кирпич, лежащий на столе, действует на него с силой $\vec{P}$, которая, как мы знаем, называется *весом* (это действие). В свою очередь, стол действует на кирпич с силой реакции опоры $\vec{N}$ (это противодействие) (рис.13.2).

Что же можно сказать о силе, действующей со стороны второго тела на первое, если мы знаем силу, действующую со стороны первого тела на второе? Ответ на этот вопрос можно получить только из опыта. Возьмем два динамометра, зацепим их друг за друга за крючки. Взявшись за кольца, будем растягивать их, следя за показаниями обоих динамометров (рис. 13.3). Мы увидим, что при любых растяжениях показания обоих динамометров будут совпадать. Следовательно, сила, с которой первый динамометр действует на второй, равна силе, с которой второй динамометр действует на первый.

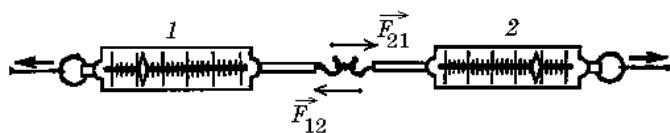


Рис. 13.3

Можно сравнить и силы взаимодействия, действующие на расстоянии. Укрепим на одной тележке магнит, на другой тележке – кусок железа и прикрепим к тележкам динамометры (рис. 13.4).

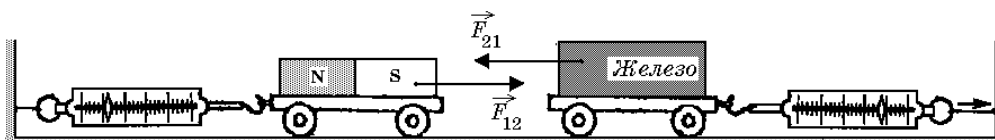


Рис. 13.4

Опыт показывает, что на каком бы расстоянии друг от друга ни находились тележки, показания динамометров всегда одинаковые. Это значит, что сила, с которой магнит притягивает железо, равна по модулю и противоположна по направлению силе, с которой железо притягивает магнит.

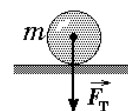
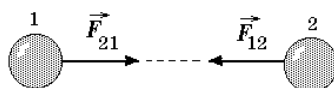
Экспериментально установлено, что движущиеся тела также взаимодействуют. При этом силы действия и противодействия равны независимо от того, с какими скоростями движутся тела и каковы их массы.

Обобщая многочисленные опытные факты, Исаак Ньютон так сформулировал свой третий закон движения, который сейчас называют *третьим законом Ньютона*:

ВСЯКОМУ ДЕЙСТВИЮ СООТВЕТСТВУЕТ РАВНОЕ И ПРОТИВОПОЛОЖНО НАПРАВЛЕННОЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ.

Если обозначить силу, действующую на 1-е тело $\vec{F}_{21}$, а силу, действующую на второе $\vec{F}_{12}$, то третий закон Ньютона можно записать в виде формулы:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (13.1)$$

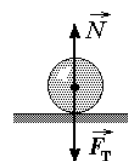


Заметим, что какую из сил считать действием, а какую противодействием – не принципиально.

Рис. 13.5

Задача 13.1. Тело массой m притягивается к Земле с силой $\vec{F}_T$ (рис. 13.5). Будем считать эту силу действием. Что же является противодействием?

Читатель: Противодействием является сила реакции опоры (рис. 13.6).



Автор: Допустим. А если наше тело падает из окна?

Читатель: Тогда противодействием является сила сопротивления воздуха $\vec{f}_c$ (рис.13.7).

Рис. 13.6

Автор: А как быть, если сопротивление воздуха отсутствует, например, в верхних слоях атмосферы?

Читатель: Тогда ... противодействия, наверное, нет...

Автор: Хорошо. На Луну со стороны Земли действует сила притяжения $\vec{F}_T$. Пусть это – действие (рис. 13.8). Что является противодействием?

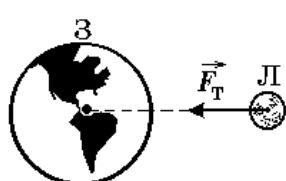


Рис. 13.8

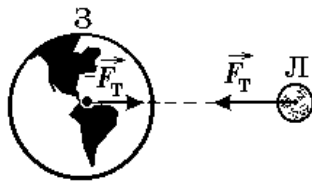


Рис. 13.9



Рис. 13.10

Читатель: Противодействием будет сила, с которой Луна притягивает Землю – $\vec{F}_T$ (рис. 13.9).

Автор: Совершенно верно! А есть ли принципиальная разница между Луной и рассматриваемым нами телом, которое падает в верхних слоях атмосферы?

Читатель: Понятно! Если действие – это сила, с которой Земля притягивает тело $\vec{F}_T$, то противодействие – это сила – $\vec{F}_T$, с которой тело притягивает Землю (рис. 13.10).

Автор: Верно. Подчеркну еще раз, что силы действия и противодействия всегда приложены к разным телам.

Задача 13.2. Лошадь тянет сани. Из третьего закона Ньютона следует, что с какой силой лошадь действует на сани, с такой же точно силой, но в обратную сторону сани действуют на лошадь (рис. 13.11). Почему же в таком случае лошадь и сани все-таки движутся с ускорением?

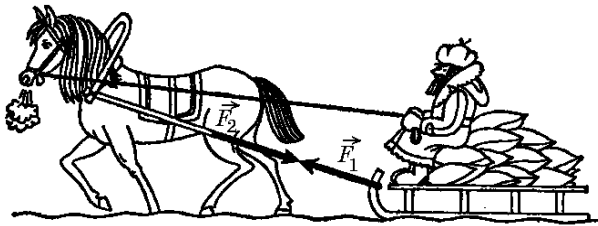


Рис. 13.11

Читатель: Я не вижу здесь никаких противоречий. Наличие ускорения было бы трудно объяснить, если бы сила, с которой лошадь действует на сани, уравновешивалась силой, с которой сани действуют на лошадь. Но эти силы не могут взаимно уничтожаться, поскольку они приложены к разным телам: одна к саням, другая – к лошади.

Автор: Ваше объяснение верно для случая, когда сани не привязаны к лошади: лошадь отталкивается от саней, в результате чего сани движутся в одну сторону, лошадь — в другую. Я же предложил Вам иной вариант: лошадь и сани связаны друг с другом, они движутся вместе как единая система. Силы взаимодействия саней и лошади приложены к разным частям одной и той же системы, и при движении этой системы как *целого* они могут рассматриваться как взаимно уравновешивающие силы.

Читатель: Тогда я не понимаю, в чем тут дело. Может быть, здесь действие не полностью уравновешивается противодействием? Все-таки лошадь – живой организм.

Автор: Иными словами, Вы опять усомнились в справедливости третьего закона Ньютона? Не спешите его отвергать. Давайте лучше подумаем, не взаимодействует ли лошадь еще с чем-нибудь, кроме саней?

Читатель: Лошадь еще, разумеется, взаимодействует с Землей...

Автор: Верно! И сани, кстати, тоже взаимодействуют с Землей. В результате имеется уже не одно, а три взаимодействия: лошадь–сани, лошадь – Земля и Земля – сани (рис. 13.12).

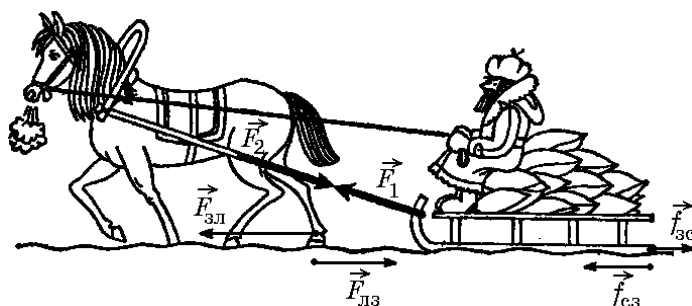


Рис. 13.12

Лошадь отталкивается от Земли с силой $\vec{F}_{лз}$. Соответственно, Земля толкает лошадь с силой $\vec{F}_{зл}$. Заметим, что $\vec{F}_{лз}$ и $\vec{F}_{зл}$ – это силы трения покоя: в момент толчка копыто лошади неподвижно относительно земной поверхности.

Земля действует на сани с силой трения скольжения $\vec{f}_{зс}$, а сани на Землю с силой $\vec{f}_{сз}$. При этом по третьему закону Ньютона: $\vec{F}_T = -\vec{F}_1$; $\vec{F}_{зл} = -\vec{F}_{лз}$; $\vec{f}_{зс} = -\vec{f}_{сз}$.

Всего, как видно из рис. 13.12, на систему «лошадь – сани» действуют четыре силы: $\vec{F}_{зл}$, $\vec{F}_1$, $\vec{F}_T$ и $\vec{f}_{зс}$. (Силу тяжести и силу реакции опоры мы не рассматриваем, так как их действия взаимно скомпенсированы.) Равнодействующая этих сил равна:

$$\vec{R} = \vec{F}_{зл} + (\vec{F}_1 + \vec{F}_T) + \vec{f}_{зс} = \vec{F}_{зл} + \vec{f}_{зс}.$$

Поскольку силы $\vec{F}_{зл}$ и $\vec{f}_{зс}$ направлены в противоположные стороны, модуль равнодействующей равен

$$R = F_{зл} - f_{зс}.$$

Стало быть, если сила, с которой лошадь отталкивается от Земли, больше силы трения саней о землю, система получит ускорение. Причем это ускорение не связано с взаимодействием лошади и саней.

Читатель: А если лошадь с санями поставить на абсолютно гладкий лед, от которого лошадь просто не сможет оттолкнуться?

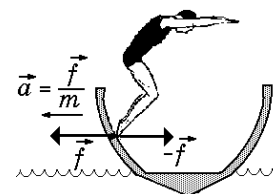
Автор: Тогда никакого движения не будет.

Задача 13.3. Человек, находясь в лодке, толкает ее в левый борт. Почему лодка остается на месте?

Читатель: Я, конечно, понимаю, что лодка тоже толкает человека в противоположную сторону, но... Давайте исходить из второго закона Ньютона: есть лодка массы m , на нее подействовала сила $\vec{f}$. Почему же лодка не получила ускорение $\vec{a} = \frac{\vec{f}}{m}$? Человека я при этом вообще не рассматриваю.

Автор: Хорошо. Человек подействовал на левый борт с силой $\vec{f}$, лодка тут же получила ускорение $\vec{a} = \frac{\vec{f}}{m}$ и толкнула человека с такой же по модулю силой $-\vec{f}$ к правому борту. Тут у меня к Вам вопрос: человек согласен, не касаясь правого борта, аккуратно выпрыгнуть за борт?

Если да, то все отлично! Лодка действительно будет двигаться с ускорением $\vec{a} = \frac{\vec{f}}{m}$, о котором Вы говорили (рис. 13.13).



Р, с. 13.13

Автор: Для того чтобы не вылететь за борт под действием силы $-\vec{f}$, с

которой его толкнул левый борт, у человека только одна возможность: упереться в правый борт с точно такой же силой $-\vec{f}$, тогда правый борт толкнет его обратно с силой $\vec{f}$. Силы, действующие на человека, скомпенсируются, и он останется в лодке (рис. 13.14).



Р, с. 13.14

Читатель: Но тогда получится, что человек действует на лодку с двумя равными по величине и противоположными по направлению силами $\vec{f}$ и $-\vec{f}$?

Автор: Совершенно верно! И именно поэтому лодка остается на месте в полном соответствии со вторым законом Ньютона.

Задача 13.4. Две лодки массами $m_1 = 100$ кг и $m_2 = 150$ кг стоят рядом неподвижно. Потом они отталкиваются друг от друга (рис. 13.15). В момент толчка ускорение первой лодки было равно $a_1 = 1,5$ м/с². Определите ускорение второй лодки.

$$m_1 = 100 \text{ кг}$$

$$m_2 = 150 \text{ кг}$$

$$a_1 = 1,5 \text{ м/с}^2$$

$$a_2 = ?$$



Рис. 13.15

Решение. Прежде всего, заметим, что лодки в момент толчка *взаимодействуют*, то есть первая лодка действует на вторую, а вторая лодка действует на первую. Причем силы, с которыми лодки действуют друг на друга, по третьему закону Ньютона по модулю равны:

$$F_1 = F_2.$$

С другой стороны, согласно второму закону Ньютона:

$$F_1 = m_1 a_1 \quad \text{и} \quad F_2 = m_2 a_2,$$

тогда

$$m_1 a_1 = m_2 a_2, \quad (13.2)$$

Из уравнения (13.2) легко получить искомое значение a_2 :

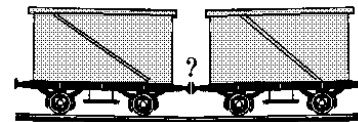
$$a_2 = \frac{m_1 a_1}{m_2} = \frac{100 \text{ кг} \cdot 1,5 \text{ м/с}^2}{150 \text{ кг}} = 1,0 \text{ м/с}^2.$$

$$\text{Ответ: } a_2 = \frac{m_1 a_1}{m_2} = 1,0 \text{ м/с}^2.$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задачи легкие

Б1. С одинаковой ли силой сжимаются буферы столкнувшихся вагонов (рис. 13.16), если массы вагонов: а) разные; б) одинаковые? Считать, что жесткость пружин одинакова.



Р, с. 13.16

Б2. Автомобиль с прицепом тормозит перед светофором. Сравните модуль силы F_1 действия машины на прицеп с модулем силы F_2 действия прицепа на машину.

Б3. Сила тяги, действующая на автомобиль, равна $F_T = 1$ кН, а сила сопротивления движению $f_c = 0,5$ кН. Являются ли эти силы силами взаимодействия?



Р, с. 13.17

Б4. Посередине гибкой доски, положенной на опоры, стоит мальчик (рис. 13.17). Масса мальчика $m = 50$ кг. С какой силой он действует на доску? С какой силой действует доска на мальчика? Изобразите эти силы на рисунке.

Б5. Два металлических шарика массами $m_1 = 50$ г и $m_2 = 70$ г испытали упругое столкновение, при этом первый шарик в момент удара получил ускорение $a_1 = 200$ м/с². Какое ускорение a_2 получил второй шарик?

Б6. Вагон массой $m_1 = 40$ т подходит к неподвижной платформе и ударяет ее буферами. При этом ускорение вагона в момент удара составило $a_1 = 20$ м/с², а ускорение платформы $a_2 = 40$ м/с². Определите массу платформы.

Б7. Две тележки, между которыми первоначально находилась сжатая пружина, разъехались в разные стороны. Известно, что отношение масс тележек равно $\frac{m_1}{m_2} = 2,5$, а модуль ускорения первой тележки $a_1 = 0,40$ м/с². Определите ускорение второй тележки.

Б8. Два мальчика, массы которых $m_1 = 40$ кг и $m_2 = 50$ кг, стоят на коньках на льду. Первый мальчик отталкивается от другого с силой $F = 40$ Н. Какие ускорения получают мальчики?

Б9. Маневровый тепловоз массой $m_1 = 100$ т толкнул покоящийся вагон. Во время взаимодействия ускорение вагона было по модулю в 5 раз больше ускорения тепловоза, то есть $\frac{a_2}{a_1} = 5$. Какова масса вагона m_2 ?



Р, с. 13.17

Б10. Мальчик, выпрыгивая из лодки на берег, отталкивается от нее с силой $F = 200$ Н (рис. 13.18). При этом ускорение мальчика относительно берега $a_1 = 5,0$ м/с², а ускорение лодки $a_2 = 2,0$ м/с². Определите массу лодки.

Задачи средней трудности

В1. Изобразите силы действия и противодействия в случаях взаимодействия тел, приведенных на рис. 13.19. Трения нет.

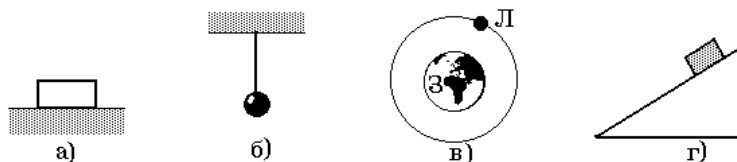
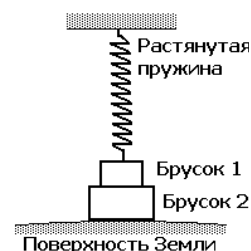


Рис. 13.19

В2. Укажите силы действия и противодействия для системы тел:
а) искусственный спутник вращается вокруг Земли; б) реактивный самолет летит с постоянной скоростью над поверхностью Земли.

В3. Укажите силы действия и противодействия между пружиной, бруском 1, бруском 2 и поверхностью Земли (рис. 13.20).



В4. Компенсируют ли друг друга силы, которые возникают при взаимодействии двух тел?

Р, с. 13.т0

В5. Что произойдет с космонавтом при свободном полете космического корабля, если он выпустит (без толчка) из рук массивный предмет? если он бросит его?

В6. Может ли человек, сидящий в лодке, привести ее в движение, упираясь в мачту?

В7. Можно ли привести в движение стальную тележку при помощи магнита, укрепленного так, как показано на рис. 13.21.

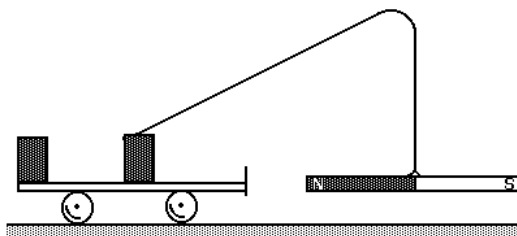


Рис. 13.21

В8. Барон Мюнхгаузен утверждал, что вытащил сам себя из болота за волосы. Обоснуйте невозможность этого.

В9. Сравните ускорения двух шаров одинакового радиуса во время взаимодействия, если первый шар сделан из стали ($\rho_{ст} = 7,8 \text{ г/см}^3$, а второй из свинца ($\rho_{св} = 11,3 \text{ г/см}^3$): $\frac{a_{ст}}{a_{св}} = ?$

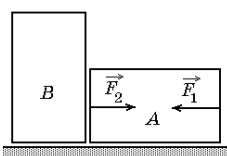
В10. Два тела массами $m_1 = 400 \text{ г}$ и $m_2 = 500 \text{ г}$ двигались друг к другу навстречу и после удара остановились. Какова скорость второго тела, если первое двигалось со скоростью $v_1 = 3 \text{ м/с}$?

В11. Вагон массой $m_1 = 60$ т подходит к неподвижной платформе со скоростью $v_1 = 0,2$ м/с и ударяет ее буферами, после этого платформа получает скорость $u = 0,4$ м/с. Какова масса платформы, если после удара скорость вагона уменьшилась до $v_2 = 0,1$ м/с?

В12. Сравните ускорения двух стальных шаров во время столкновения $\left(\frac{a_1}{a_2}\right)$, если радиус первого шара в 2 раза больше радиуса второго шара $\left(\frac{R_1}{R_2} = 2\right)$. Зависит ли ответ от начальной скорости шаров?

В13. Автомобиль движется с ускорением $a = 1$ м/с². С какой силой F человек массой $m = 70$ кг давит на спинку сидения?

Задачи трудные



Г1. Сила $\vec{F}_1$ действует на тело А (рис. 13.22). Так как само тело действует на тело В, то последнее в свою очередь действует на тело А с силой $\vec{F}_2$. Равна ли нулю равнодействующая этих двух сил? Трением тел об опору пренебречь.

Р, с. 13.тт

Г2. Тележка движется по горизонтальной поверхности: прямолинейно и равномерно (рис. 13.23,а); ускоренно (рис. 13.23,б); замедленно (рис. 13.23,в). Покажите силы, действующие на груз, находящийся на тележке в каждом случае, если он неподвижен относительно ее. Какая сила приводит груз в движение в каждом случае и куда она направлена? Какие силы действуют на тележку? Сопротивлением воздуха пренебречь.

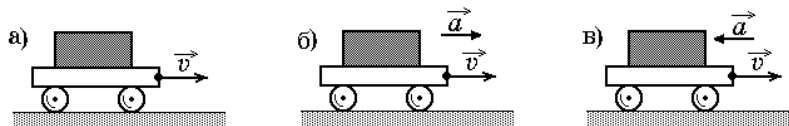
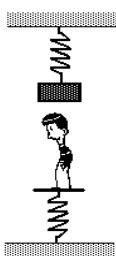


Рис. 13.23



Г3. Пружинные весы прикреплены к потолку и к ним подвешен груз массой $m = 150$ кг. Под грузом стоит человек на платформе пружинных весов, которые показывают вес человека $P = 700$ Н (рис. 13.24). Каковы будут показания весов, если человек с усилием $F = 350$ Н будет: а) стараться поднять груз; б) тянуть груз вниз?

Р, с. 13.т4

Г4. Почему при столкновении легковой автомашины с грузовиком повреждений у легковой машины всегда больше, чем у грузовой?

Г5. При столкновении двух тележек, движущихся по горизонтальной плоскости, проекция вектора скорости на ось X первой тележки изменилась от $v_{1X} = 3$ м/с до $v_{2X} = 1$ м/с, а проекция скорости второй тележки на ту же ось изменилась от $u_{1X} = -1$ м/с до $u_{2X} = +1$ м/с. Ось X , связанная с землей, расположена горизонтально, и ее положительное направление совпадает с направлением вектора начальной скорости первой тележки. Опишите движение тележек до и после взаимодействия. Сравните массы тележек: $\frac{m_1}{m_2} = ?$

14. ВЕС И НЕВЕСОМОСТЬ

Что такое вес?

Автор: Как Вы уже знаете из курса 7 класса, *весом* тела называется сила $\vec{P}$, с которой тело действует на опору или подвес.

Например, если на столе лежит книга, то весом книги является сила, с которой книга давит на стол (рис. 14.1,а), если на пружине подвешен груз, то весом груза является сила, с которой груз действует на место подвеса (рис. 14.1,б).

Возникает вопрос: чему равен вес тела массой m , если тело неподвижно лежит на горизонтальной опоре (рис. 14.2)? На тело действуют две силы: сила тяжести $\vec{F}_T$ и сила реакции опоры $\vec{N}$. Поскольку тело неподвижно, равнодействующая этих двух сил равна нулю, то есть:

$$\vec{N} + \vec{F}_T = \vec{0} \Rightarrow \vec{N} = -\vec{F}_T \Rightarrow$$

$$N = F_T = mg.$$

Теперь рассмотрим *взаимодействие* тела и стола. Пусть $\vec{N}$ – сила, с которой опора действует на тело, – это действие. Что тогда будет противодействием?

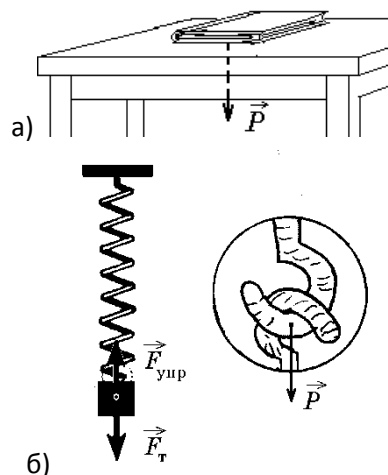


Рис. 14.1

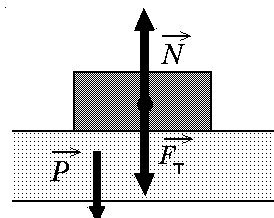


Рис. 14.2

Читатель: Сила, с которой тело действует на опору, то есть вес $\vec{P}$.

Автор: Верно! А по третьему закону Ньютона $\vec{P} = -\vec{N}$, $P = N = mg$. Итак, запомним, что вес тела, неподвижно лежащего на горизонтальной опоре равен силе тяжести:

$$P = mg. \quad (14.1)$$

Причем направления сил $\vec{P}$ и $\vec{mg}$ совпадают: обе силы направлены вертикально вниз.

Читатель: Получается, что справедливо векторное равенство $\vec{P} = \vec{mg}$? То есть вес и сила тяжести одна и та же величина?

Автор: В данном случае *величина* действительно одна и та же, но физический смысл, конечно, разный: сила тяжести приложена к *телу*, а вес приложен к *опоре*. Величина силы тяжести определяется взаимодействием Земли и тела и никак не зависит от характера движения

опоры, на которой находится тело. Значение веса определяется взаимодействием тела и опоры и, вообще говоря, зависит от того, как именно движется опора.

Читатель: Вы хотите сказать, что если опора, на которой лежит тело (стол, например) будет двигаться, то сила тяжести не изменится, а вес может измениться?

Автор: Именно! Сила тяжести точно не изменится, а вес может измениться, а может и не измениться.

Задача 14.1. Тело массой $m = 2,0$ кг лежит на столе в купе поезда, движущегося равномерно со скоростью $v = 20$ м/с. Определите вес тела.

Читатель: Если тело движется равномерно, то равнодействующая равна нулю. А значит, этот случай ничем не отличается от только что разобранного, когда тело лежало на неподвижной опоре. То есть вес тела равен силе тяжести:

$$P = mg = 2,0 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \approx 20 \text{ Н}.$$

Ответ: $P = mg \approx 20 \text{ Н}$.

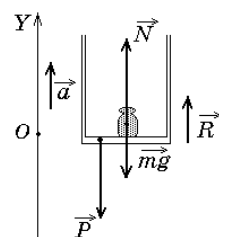
Автор: Совершенно верно! Замечу лишь, что совсем непринципиально, в каком направлении движется опора: горизонтально, вверх, вниз или под углом к горизонту. Если движение равномерное, то в любом случае $P = mg$! Ну, а скорость в этой задаче совершенно не причём. Это так называемое лишнее данное, которое иногда дают в условии задачи, чтобы учащиеся не теряли бдительности.

Вес тела в лифте, ускоряющемся вертикально вверх

Задача 14.2. Гири массой $m = 16$ кг находится в лифте, который разгоняется вверх с ускорением $a = 2,0$ м/с². Определите вес гири.

$m = 16 \text{ кг}$	Решение. И в этом случае вес $\vec{P}$ и сила реакции опоры $\vec{N}$ связаны соотношением $\vec{P} = -\vec{N}$ как действие и противодействие. Поэтому, чтобы найти P , достаточно найти N .
$a = 2,0 \text{ м/с}^2$	
$P = ?$	

Даже не производя вычислений, легко догадаться, что поскольку ускорение направлено вверх, то и равнодействующая всех сил, действующих на тело, направлена вверх, так как $\vec{R} = \vec{ma}$. Значит, сила $\vec{N}$, направленная вверх, должна быть больше по модулю, чем сила $\vec{mg}$, направленная вниз (рис. 14.2). Следовательно, и вес гири в лифте должен быть больше, чем на неподвижном столе.



Теперь проверим наши соображения расчетами. Запишем второй закон Ньютона в векторной форме:

$$\vec{N} + \vec{mg} = \vec{ma}. \quad (1)$$

Введем ось Y , направленную вверх, и найдем проекции векторов $\vec{N}$, $\vec{mg}$ и $\vec{a}$ на эту ось, получим:

$$N_Y = +N, \quad mg_Y = -mg, \quad a_Y = +a.$$

Если два вектора равны между собой, то равны и проекции этих векторов на любую ось. Поэтому из равенства (1) следует:

$$N_Y + mg_Y = ma_Y. \quad (2)$$

Подставив в (2) значения проекций, получим:

$$N + (-mg) = +ma \Rightarrow N = ma + mg = m(a + g).$$

Так как $P = N$, то

$$P = m(a + g). \quad (14.2)$$

Итак, мы получили формулу для вычисления веса тела в лифте, движущемся с ускорением $\vec{a}$, направленным вверх.

Подставим в нее численные значения:

$$\begin{aligned} P &= m(a + g) = \\ &= 16 \text{ кг} \cdot (2,0 \text{ м/с}^2 + 9,8 \text{ м/с}^2) = 188,8 \text{ Н} \approx 1,9 \cdot 10^2 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Ответ: $P = m(a + g) \approx 1,9 \cdot 10^2 \text{ Н}$.

Перегрузка при запуске космических кораблей

Итак, при движении с ускорением, направленным вверх, вес тел возрастает. Именно этот эффект испытывают на себе космонавты при запуске космических кораблей.

Перегрузкой α называется отношение веса космонавта P в данный момент полета к его весу P_0 в обычных условиях:

$$\alpha = \frac{P}{P_0}. \quad (14.3)$$

Задача 14.3. Ракета-носитель выводит на орбиту космический корабль с ускорением $a = 30 \text{ м/с}^2$, направленным вертикально вверх. Определите перегрузку космонавта.

$a = 30 \text{ м/с}^2$	Решение. Пусть m – масса космонавта. При движении с ускорением $\vec{a}$, направленным вертикально вверх, вес космонавта согласно формуле (14.2) равен
$\alpha = ?$	

$$P = m(a + g).$$

В обычных условиях вес космонавта равен силе тяжести

$$P_0 = mg.$$

Подставляя значения P и P_0 в формулу (14.3), получим:

$$\alpha = \frac{P}{P_0} = \frac{m(a + g)}{mg} = \frac{ma}{mg} + \frac{mg}{mg} = \frac{a}{g} + 1.$$

Значит, перегрузка равна:

$$\alpha = \frac{a}{g} + 1. \quad (14.4)$$

Подставим численные значения:

$$\alpha = \frac{a}{g} + 1 = \frac{30 \text{ м/с}^2}{9,8 \text{ м/с}^2} + 1 = 4,06 \approx 4,1.$$

То есть вес космонавта увеличился в 4,1 раза.

Ответ: $\alpha = \frac{a}{g} + 1 \approx 4,1$ раза.

Читатель: Если лифт или ракета разгоняются вертикально вверх, то вес пассажиров увеличивается. Это понятно. А как изменяется вес, если лифт или ракета движутся вниз, но с торможением? Ведь вектор ускорения при этом тоже направлен вверх.

Автор: Заметьте, что в задаче 14.2 при вычислении веса мы нигде не учитывали направление скорости лифта. Мы учитывали *только* направление ускорения. А ускорение при движении по вертикали может быть направленным вверх в двух случаях: когда тело разгоняется вверх и когда тело движется вниз и при этом тормозит. В обоих этих случаях вес вычисляется по формуле (14.2).

Кстати, наибольшие перегрузки космонавты испытывают как раз не во время взлета, а в момент так называемой «мягкой посадки», когда спускаемый на парашюте космический аппарат касается поверхности земли. Бывали случаи, когда в этот момент перегрузки достигали 10 и даже 15!

Пассажир обыкновенного пассажирского лифта тоже испытывает небольшую перегрузку: 1) когда лифт начинает подниматься вверх; 2) когда лифт останавливается на нижнем этаже. Не верите – проверьте экспериментально!

Вес тела в лифте, ускоряющемся

вертикально вниз с ускорением $a < g$

Задача 14.4. В лифте, который ускоряется вертикально вниз, находится гиля массой $m = 16$ кг. Определите вес гири, если модуль ускорения $a = 2,0 \text{ м/с}^2$.

$$m = 16 \text{ кг}$$

$$a = 2,0 \text{ м/с}^2$$

$$P = ?$$

Решение. Так же, как и в случае, разобранный в задаче 14.2, вес P и сила реакции опоры N по третьему закону Ньютона связаны соотношением $\vec{P} = -\vec{N}$, поэтому чтобы найти P , достаточно найти N .

Автор: Как Вы считаете, что в данном случае больше: вес или сила тяжести?

Читатель: Так как ускорение направлено вниз, то и равнодействующая направлена вниз (рис. 14.4), поэтому ясно, что сила тяжести $\vec{mg}$, направленная вниз, должна быть больше силы реакции опоры $\vec{N}$, направленной вверх, то есть $mg > N$. Так как $P = N$, то $mg > P$, значит, вес должен быть меньше силы тяжести.

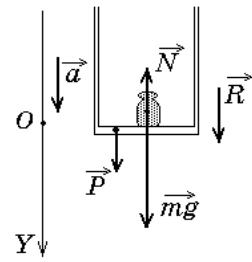


Рис. 14.4

Автор: Логично. Проверим это расчетами. Запишем второй закон Ньютона в векторной форме:

$$\vec{N} + \vec{mg} = \vec{ma}.$$

Введем ось Y , направленную вертикально вниз, и найдем проекции векторов $\vec{N}$, $\vec{mg}$ и $\vec{a}$ на эту ось, получим:

$$N_Y = -N, \quad mg_Y = +mg, \quad a_Y = +a.$$

Для проекций сил справедливо равенство:

$$N_Y + mg_Y = ma_Y.$$

Подставив в него значения проекций $\vec{N}$, $\vec{mg}$ и $\vec{a}$, получим:

$$-N + mg = ma \Rightarrow N = mg - ma = m(g - a).$$

Так как $P = N$, то мы получили формулу для вычисления веса тела в лифте, движущемся с ускорением a , направленным вертикально вниз:

$$P = m(g - a). \quad (14.5)$$

Подставим в нее численные значения:

$$P = m(g - a) = 16 \text{ кг} \cdot (9,8 \text{ м/с}^2 - 2,0 \text{ м/с}^2) = 124,8 \text{ Н} \approx 1,2 \cdot 10^2 \text{ Н}.$$

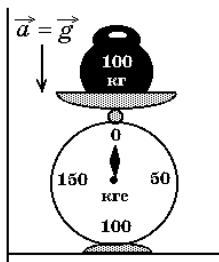
Ответ: $P = m(g - a) \approx 1,2 \cdot 10^2 \text{ Н}$.

Невесомость

Читатель: А что будет, если лифт будет двигаться с ускорением $a = g$, направленным вертикально вниз?

Автор: В этом случае по формуле (14.5) получим:

$$P = m(g - g) = 0.$$



Р, с. 14.5

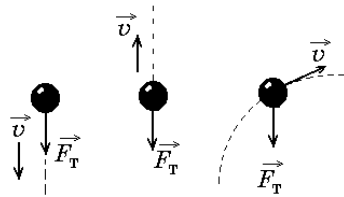
То есть тело вообще не давит на опору. Если в лифте, движущемся вертикально вниз с ускорением g , поставить гирию на пружинные весы, то весы покажут ноль независимо от массы гири (рис. 14.5). Ясно, что не одна только гирия, но и все остальные тела в этом лифте будут *невесомы*, то есть их вес будет равен нулю. И человек, оказавшийся в этом лифте, тоже будет испытывать то удивительное состояние, которое называется *невесомостью*.

Человек может спокойно парить в воздухе, не касаясь ни пола, ни стен, ни

потолка. Вода, вылитая из бутылки, не разольется по полу, а соберется в огромную шарообразную каплю, которая будет медленно плавать в воздухе. Можно сказать, что понятия «верх» и «низ» в этом лифте как бы перестают существовать.

Читатель: А будет ли наблюдаться невесомость в лифте, которому сообщили скорость вертикально вверх (например, с помощью мощной пружины), а потом дали возможность свободно двигаться под действием одной силы тяжести?

Автор: Конечно! Прежде всего, заметим, что в каком бы направлении ни двигалось тело в свободном полете вблизи поверхности Земли, оно (если не учитывать силу сопротивления воздуха) всегда движется с ускорением $\vec{g}$, направленным вертикально вниз. В самом деле, на



Р, с. 14.6

такое тело действует одна-единственная сила – сила тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$ (рис. 14.6). По второму закону Ньютона ускорение тела равно:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_T}{m} = \frac{m\vec{g}}{m} = \vec{g}.$$

Формула (14.5) справедлива для любого движения, при котором ускорение направлено вертикально вниз, а направление скорости может быть произвольным, то есть наш лифт может двигаться вверх, вниз или под углом к горизонту. В любом случае тела в лифте будут невесомы (до тех пор, разумеется, пока лифт не упадет на землю: в этот момент возникнут опасные для жизни перегрузки).

Читатель: Значит, барон Мюнхгаузен, который летел, сидя на пушечном ядре, находился в состоянии невесомости?

Автор: Если бы не сила сопротивления воздуха, пренебрегать которой при полетах верхом на ядре, к сожалению, нельзя, то да. Но если бы барон совершал свой полет на Луне, где нет атмосферы, а значит, и сопротивления воздуха, то в течение всего полета он бы находился в состоянии невесомости.

Читатель: Интересно было бы испытать на себе состояние невесомости, но оказаться в кабине лифта, которая свободно падает с ускорением $\vec{g}$, честно говоря, не хотелось бы. А нельзя ли организовать невесомость без риска для жизни?

Автор: Космонавты при подготовке к космическим полетам используют два способа: 1) тренировки проводятся под водой в специальном бассейне, а вес скафандров подбирают таким, чтобы сила Архимеда полностью компенсировала силу тяжести; 2) тренировки проводятся в самолете, который движется точно по траектории тела, брошенного под углом к горизонту с ускорением, равным g . Для этого двигатели самолета развивают усилие, которое в точности компенсирует силу сопротивления воздуха, в результате чего космонавты оказываются в положении барона Мюнхгаузена, летящего на ядре, но без сопротивления воздуха. Конечно, долго такой полет длиться не может (от силы 2–3 минуты), да и дорогое это удовольствие.

Вес тела в лифте, ускоряющемся вертикально вниз с ускорением $a > g$

Читатель: А что будет, если лифт будет ускоряться вниз с ускорением, большим g ?

Автор: Будет еще интереснее!

Задача 14.5. Лифт ускоряется вертикально вниз с ускорением $a = 12 \text{ м/с}^2$. Определите величину и направление веса гири массой $m = 16 \text{ кг}$, находящейся в лифте.

$$m = 16 \text{ кг}$$

$$a = 12 \text{ м/с}^2$$

$$P = ?$$

Автор: Прежде всего, заметим, что равнодействующая $\vec{R} = \vec{ma}$ направлена вертикально вниз, а так как $a > g$, то $R = ma > mg$. То есть силы тяжести просто не хватает на то, чтобы сообщить гире такое ускорение.

Читатель: Наверное, сила реакции опоры в этом случае должна «помогать» силе тяжести, то есть быть направленной вниз. Но разве это возможно?

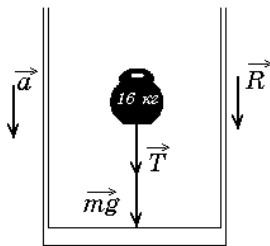


Рис. 14.7

Автор: Вполне! Представьте себе, что мы привязали гирю к полу веревочкой, тогда сила натяжения нити как раз и «поможет» силе тяжести придать гире ускорение $a > g$ (рис. 14.7).

Читатель: Раз нить натянута, то получается, что у гири есть «желание» взлететь к потолку лифта?

Автор: Совершенно верно! Гирю можно совершенно спокойно поставить на потолок, тогда веревочка не понадобится, а сила реакции опоры $\vec{N}$ будет направлена вертикально вниз. Пассажир лифта тоже может стоять на потолке вниз головой (рис. 14.8). Вообще в этом «ненормальном» лифте верх и низ как бы меняются местами. А вес гири будет приложен к потолку и направлен вертикально вверх, так как по третьему закону Ньютона $\vec{P} = -\vec{N}$. Запишем второй закон Ньютона в векторной форме:

$$\vec{N} + \vec{mg} = \vec{ma}.$$

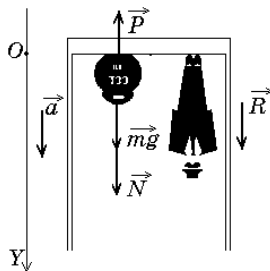


Рис. 14.8

Введем ось Y , направленную вертикально вниз, тогда:

$$N_Y = N, \quad mg_Y = mg, \quad a_Y = a.$$

Для проекций сил на ось Y справедливо равенство:

$$N_Y + mg_Y = ma_Y.$$

Подставив в него значения проекций N , mg и a , получим:

$$N + mg = ma \Rightarrow N = m(a - g).$$

Так как $P = N$, то мы получили формулу для вычисления веса:

$$P = m(a - g). \quad (14.6)$$

Подставим в нее численные значения:

$$P = m(a - g) = 16 \text{ кг} \cdot (12 \text{ м/с}^2 - 9,8 \text{ м/с}^2) = 35,2 \text{ Н} \approx 35 \text{ Н}.$$

Ответ: $P = m(a - g) \approx 35 \text{ Н}$.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задачи очень легкие



Р, с. 14.9

A1. На подставке неподвижно стоит гиря. Покажите на рис. 14.9 силу «вес гири».

A2. На полу лифта лежит груз массой $m = 10$ кг. Лифт движется с ускорением $a = 6,0 \text{ м/с}^2$, направленным вверх. Найдите силу давления груза на пол лифта.

A3. С какой силой F будет давить на дно шахтной клетки груз массой $m = 100$ кг, если клеть поднимается с ускорением $a = 24,5 \text{ см/с}^2$?

A4. Космический корабль стартует вертикально вверх с ускорением $a = 50 \text{ м/с}^2$. Определите перегрузку.

A5. Определите перегрузку космонавтов при старте ракеты с ускорением $a = g$.

A6. Лифт движется с ускорением $a = 7,0 \text{ м/с}^2$, направленным вниз. Найдите силу давления груза массой $m = 100$ кг на пол лифта.

A7. Масса кабины лифта с пассажирами $m = 800$ кг. Определите вес кабины, если кабина движется с ускорением $a = 1,0 \text{ м/с}^2$, направленным вниз.

A8. Исчезает ли сила притяжения тела к Земле при переходе тела в состояние невесомости?

Задачи легкие

B1. В лифте установлены пружинные весы, на которых стоит человек массой $m = 70$ кг. Каковы показания весов, если лифт движется равномерно со скоростью $v = 5,0 \text{ м/с}$: а) вверх; б) вниз?

B2. Бетонную плиту массой $m = 500$ кг подъемным краном перемещают: а) равномерно вверх; б) равномерно вниз; в) горизонтально. Чему равны действующая на плиту сила тяжести и вес плиты каждом из этих случаев?

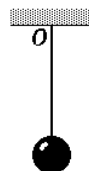
B3. На нити поднимается груз массой $m = 2,0$ кг с ускорением $a = 4,0 \text{ м/с}^2$, направленным вертикально вверх. Найдите силу, с которой нить действует на груз.

B4. В лифте находится пассажир. Определите его массу, если вес пассажира в начале подъема с ускорением $a = 2,0 \text{ м/с}^2$ был равен $P = 708 \text{ Н}$.

B5. Космонавты достаточно долгое время могут выдерживать перегрузку $\alpha = 4$. Какому ускорению при старте с Земли соответствует эта величина?

B6. С каким максимальным ускорением может стартовать космическая ракета, если максимальная перегрузка для космонавтов равна $\alpha = 10$?

B7. Шарик массы m висит на нити, которая закреплена в точке O (рис. 14.10). С каким ускорением и в каком направлении по вертикали следует перемещать точку



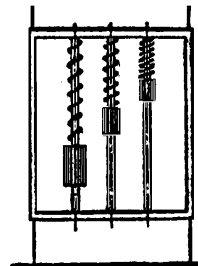
Р, с. 14.10

подвеса O , чтобы натяжение нити было равно половине веса шарика?

Б8. На дне шахтной клетки, которая разгоняется вертикально вниз с ускорением $a = 0,40 \text{ м/с}^2$, лежит груз, вес которого равен $P = 940 \text{ Н}$. Определите массу груза.

Б9. В лифте установлены пружинные весы, на которых стоит человек. Как изменяются показания весов при движении лифта вверх и вниз с учетом изменений характера движения лифта?

Б10. В приборе Н.А. Любимова, предназначенном для демонстрации взаимодействия тел при свободном падении, на легкой рамке подвешены на одинаковых пружинах три гири весом в 1 кгс, 2 кгс и 3 кгс (рис. 14.11). Как изменится положение грузов и с какой силой будет натянута каждая из пружин во время свободного падения рамки?



Р, с. 14.11

Б11. На дне шахтной клетки лежит груз массой $m = 100 \text{ кг}$. Каков будет вес груза, если клеть:

- а) поднимается вверх с ускорением $a = 0,30 \text{ м/с}^2$;
- б) опускается с ускорением $a = 0,40 \text{ м/с}^2$;
- в) движется равномерно;
- г) свободно падает?

Задачи средней трудности

В1. Ракета-носитель вместе с космическим кораблем движется вертикально вверх с постоянной скоростью $v = 1,0 \text{ км/с}$ вблизи поверхности Земли. Определите массу космонавта, находящегося в космическом корабле, если его вес $P = 100 \text{ кгс}$.

В2. Веревка выдерживает груз массой $m_{\text{max}} = 110 \text{ кг}$. Порвется ли веревка, если на ней поднимать вертикально вверх груз массой $m = 105 \text{ кг}$ с постоянной скоростью $v = 10 \text{ м/с}$?

В3. Проволока выдерживает груз массы $m_{\text{max}} = 450 \text{ кг}$. С каким максимальным ускорением можно поднимать груз массы $m = 400 \text{ кг}$, подвешенный на этой проволоке, чтобы она не оборвалась?

В4. К канату подвешена клеть. Клеть движется с ускорением $a = 1,6 \text{ м/с}^2$, направленным вертикально вверх. Сила натяжения каната $T = 3,42 \text{ кН}$. Какова масса клетки?

В5. Космическая ракета при старте с поверхности Земли движется вертикально с ускорением $a = 20 \text{ м/с}^2$. Найдите вес летчика-космонавта в кабине, если его масса $m = 80 \text{ кг}$. Какую перегрузку испытывает летчик?

В6. Космический корабль совершает мягкую посадку на Луну ($g_{\text{л}} = 1,6 \text{ м/с}^2$), двигаясь замедленно в вертикальном направлении (относительно Луны) с постоянным ускорением $a = 8,4 \text{ м/с}^2$. Сколько весит космонавт массой $m = 70 \text{ кг}$, находящийся в этом корабле?

В7. Масса лифта с пассажирами $m_1 = 800 \text{ кг}$. Найдите ускорение лифта и его направление, если сила натяжения троса, на котором подвешена кабина лифта, такая же, как у неподвижного лифта массы $m_2 = 600 \text{ кг}$.

В8. В лифте установлены пружинные весы, на которых подвешено тело массой $m = 0,50$ кг. Что будут показывать весы, если:

- а) лифт поднимается с увеличивающейся скоростью;
- б) лифт поднимается с уменьшающейся скоростью;
- в) лифт опускается с увеличивающейся скоростью;
- г) лифт опускается с уменьшающейся скоростью;
- д) лифт покоится;
- е) лифт равномерно поднимается;
- ж) лифт равномерно опускается?

В случаях а), б), в), г) движение считать равнопеременным с ускорением, равным по модулю $a = 2,4 \text{ м/с}^2$.

В9. Груз, выпущенный из руки, свободно падает и находится в состоянии невесомости. А если тело брошено вверх?

В10. С каким ускорением a может тормозиться поднимающийся лифт, чтобы груз, лежащий на полу лифта, не отставал от него?

В11. Лифт движется вертикально вниз с ускорением $a = 22 \text{ м/с}^2$. Чему равен вес пассажира массой $m = 100 \text{ кг}$? Куда он направлен?

В12. Какую перегрузку испытывает космонавт, находящийся в ракете, разгоняющейся вертикально вниз с ускорением $a = 3g$ вблизи поверхности Земли?

В13. С каким ускорением, направленным вертикально вниз, должен двигаться лифт, чтобы привязанный нитью к полу грузик массой $m = 100 \text{ г}$ натягивал нить с силой $T = 1,00 \text{ кгс}$?

В14. С каким ускорением, направленным вертикально вниз, должен двигаться лифт, чтобы человек массой $m = 70 \text{ кг}$, стоя на потолке лифта, действовал на потолок весом $P = 7,0 \text{ Н}$?

Задачи трудные

Г1. В романе Жюль Верна «Из пушки на Луну» космонавты стартовали с Земли в пушечном снаряде. Какую перегрузку испытывали космонавты, если скорость снаряда при вылете из пушки была равна $v = 11,2 \text{ км/с}$, а длина ствола пушки $l = 100 \text{ м}$? Какой вес имел во время старта спичечный коробок массой $m = 10 \text{ г}$?

Г2. Ракета-носитель вместе с космическим кораблем имеет стартовую массу $m = 300 \text{ т}$. В начале старта космонавты испытывают перегрузку, равную $\alpha = 2,7$. Определите силу тяги одного двигателя, если при старте запускаются одновременно четыре одинаковых двигателя.

Г3. Веревка выдерживает груз массы $m_1 = 110 \text{ кг}$ при подъеме его с некоторым ускорением, направленным по вертикали, и груз массы $m_2 = 690 \text{ кг}$ при опускании его с таким же по модулю ускорением. Какова максимальная масса m_{max} груза, который можно поднять на этой веревке, двигая его с постоянной скоростью?

Г4. Ящик, заполненный шарами, брошен вверх. Как меняется сила давления шаров на дно и боковые стенки ящика и друг на друга во время полета ящика? Как изменится ответ, если ящик брошен под углом к горизонту? Сопротивление воздуха не учитывать.

Г5. Тяжелое тело подвешено на пружине к потолку кабины лифта. Каково будет движение тела относительно кабины, если внезапно кабина начинает свободно падать под действием силы тяжести?

Г6. Космическая ракета, разгоняется вертикально вниз вблизи поверхности Луны с ускорением $a = 9,8 \text{ м/с}^2$. Ускорение свободного падения на Луне $g_{\text{л}} = 1,6 \text{ м/с}^2$. Космонавт при этом имеет вес $P = 500 \text{ Н}$. Какова масса космонавта?

