

4. Поле тяготения

4.1 Движение по вертикали

В настоящем разделе мы займемся понятиями притяжения земли и силы тяжести, а также телами, которые падают на землю. Поскольку до сих пор рассматривалось только горизонтальное движение, то теперь пришло время поговорить о вертикальном направлении. При этом все сказанное о горизонтальном движении можно перенести на движение по вертикали. Нам надо только повернуть ось x - ов на 90° , чтобы она стала вертикальной. Также будем считать, что x - ось направлена вниз. Это означает следующее:

импульс тела является положительным, если оно движется вниз, и отрицательным, если тело движется вверх.

В разделе 3.8 мы получили следующее правило:

поток импульса направо вызывается напряжением сжатия,

поток импульса налево вызывается напряжением растяжения

То, что раньше было направо, теперь стало вниз, и что было налево, теперь стало вверх. Поэтому данное правило можно переформулировать по-новому:

поток импульса вниз вызывается напряжением сжатия,

поток импульса вверх вызывается напряжением растяжения

Дальше в качестве примера рассмотрим замкнутый поток импульса на рис. 4.1



Рис. 4. 1. Замкнутый поток импульса, для которого ось X направлена вертикально.

4.2. Притяжение земли - поле тяготения

Все тела притягиваются землей. На это указывает два рода явлений:

1. Если какое-нибудь тело отпускают из руки, то оно падает вниз.
2. Каждое тело имеет вес.

Оба явления показывают, что тела получают импульс из земли. Падающее тело со временем падает все быстрее и быстрее: его импульс увеличивается.

То, что не только падающее тело может получать импульс, можно видеть на примере тела, подвешенного на динамометре (рис. 4.2). Динамометр показывает, что из тела происходит постоянный отток импульса, который через подвесную систему стекает в землю. Очевидно запас импульса при этом должен постоянно пополняться. Постоянный приток импульса в тело происходит по связи между телом и землей, которую, однако, невозможно увидеть.

Раньше мы уже рассмотрели аналогичную связь (соединение), проводящую импульс, т.е. связь, которую невозможно увидеть, а именно: магнитное поле. В нашем случае речь, однако, идет не о магнитном поле, поскольку в нем к земле притягивались бы только магниты или железные предметы. Эта связь представляет собой такое образование, которое не являясь магнитным полем вместе с тем родственно ему.

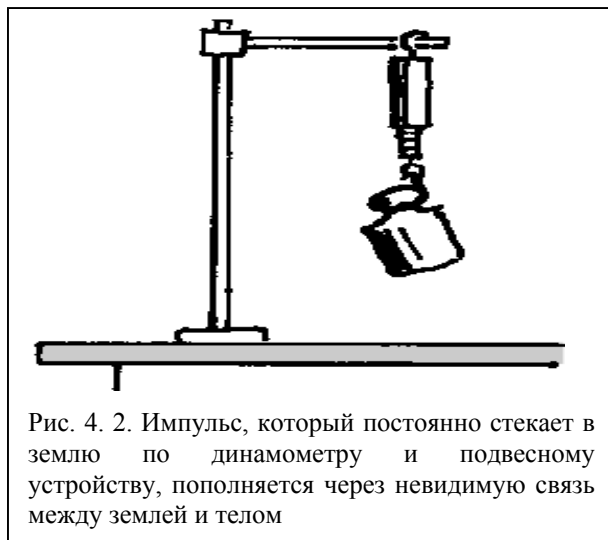


Рис. 4. 2. Импульс, который постоянно стекает в землю по динамометру и подвесному устройству, пополняется через невидимую связь между землей и телом

Оно получило название поля тяготения, или гравитационного поля. Как магнитный полюс окружен магнитным полем, так каждое тело, имеющее массу, окружено гравитационным полем. Чем больше масса тела, тем интенсивнее это поле.

Каждое тело окружено гравитационным полем. Чем больше масса тела, тем интенсивнее это поле. Посредством поля тяготения импульс передается от одного тела к другому. Притяжение тел к земле осуществляется за счет потока импульса от земли к данному телу.

4.3. От чего зависит сила притяжения земли

Это можно проверить следующим образом. Подвесим вначале на динамометре кусок железа массой 1 кг, а потом кусок дерева массой 1 кг. Динамометр в обоих случаях покажет одно и то же. Будет ли это неожиданностью? Конечно, нет. Но как определяется, что тело из железа или дерева имеют массу 1 кг? Разумеется, с помощью весов. Но некоторые весы действуют точно так же как и динамометр. Поэтому определим для весов или для динамометра что следует понимать под одинаковой массой: если два тела вызывают одно и то же показание (удлинение) динамометра, то они имеют одинаковую массу.

Сказанное можно сформулировать еще по-другому: если в два тела втекают из земли одинаковые потоки импульса, то эти тела имеют одинаковую массу.

Возьмем два тела массой 1 кг. Сложим их вместе так, чтобы они составили одно тело массой 2 кг. В это тело втекает поток импульса, который в два раза больше, чем втекающий по отдельности в эти тела до их соединения. Тебе это может показаться само собой разумеющимся. Надо совершенно отчетливо осознавать, что присоединение второго тела влияет на поток импульса, который втекает в первое тело. Возникает вопрос, как велик поток импульса, который втекает в тело массой 1 кг. Динамометр при этом показывает величину потока приблизительно 10 Н. Более точное измерение дает значение 9,81 Н. В тело массой 2 кг втекает соответственно $2 \cdot 9,81 = 19,62$ Н,

а в тело массой 10 кг соответственно 98,1 Н.

Таблица 4.1. Значения фактора места.

Место	g , Н/кг
Центральная Европа	9,81
Северный и южный полюсы	9,83
Экватор	9,78
Поверхность Луны	1,62
Поверхность Марса	3,8
Поверхность Солнца	274
Поверхность нейтронной звезды	1 000 000 000 000

Таким образом, мы опять сталкиваемся с пропорциональностью: сила тока импульса, втекающего в некоторое тело из земли, пропорциональна массе этого тела:

$$F \sim m$$

Коэффициент пропорциональности равен 9,81:

$$F = m \cdot 9,81 \text{ Н / кг}$$

Наши рассуждения пока еще неполны. Один килограмм железа весит столько же, сколько и один килограмм дерева, но один килограмм железа на Луне имеет другой вес, чем на Земле. Поэтому сделаем следующий мысленный эксперимент. Возьмем тело массой 1 кг и взвесим его в различных местах: у себя дома, потом на северном полюсе и на экваторе, на Луне, Марсе, на поверхности Солнца и на нейтронной звезде. Результаты взвешиваний приведены в таблице 4.1.

В любом месте имеет место пропорциональность

$$F \sim m,$$

но коэффициент пропорциональности в различных местах имеет разные значения. В различных точках поверхности земли эти значения мало отличаются, а на других космических телах эти отклонения уже значительны. Запишем связь между F и m в общем виде

$$F = m \cdot g$$

Поскольку коэффициент g зависит от места нахождения тела, имеющего массу m , то назовем его *фактором места*.

Сила тока импульса из земли в некоторое тело равна произведению массы тела на фактор места. Фактор места на поверхности земли имеет величину равную 9,81 Н/кг \approx 10 Н/кг.

Притяжение земли можно также описывать в модели, использующей понятие силы. Тогда величину F называют силой тяжести или весом и говорят, что на тело действует сила тяготения.

Что подразумевается, когда о некотором теле говорят, что оно очень тяжелое? Это означает, что его трудно поднять с земли. Подразумевается ли при этом, что оно имеет большую массу? Скорее всего нет. На Луне было бы совсем не тяжело поднять это “тяжелое” тело с поверхности. Под словом “тяжелый” подразумевается большой поток импульса, втекающий в тело, или иначе больший вес этого тела. Одно и то же тело может быть тяжелее или легче в зависимости от того, где оно находится.

Задачи

1. Какой величины поток импульса втекает в твое тело из земли? (Какая сила тяжести действует на твое тело?) Какой величины этот поток будет на Луне и на нейтронной звезде?
2. Космонавты во время экспедиции на Луну измерили с помощью динамометра вес одного тела и нашли, что $F = 300$ Н. Какова масса этого тела?

4.4. Свободное падение

Если мы возьмем некоторое тело в руку и потом его отпустим, то оно начнет падать по направлению к земле. Теперь это явление можно объяснить. В тело втекает поток импульса силой $F = m \cdot g$, т.е. его импульс непрерывно возрастает. В результате оно падает тем быстрее, чем дольше оно падает.

При этом происходит нечто удивительное. Если два тела, одно тяжелое и одно легкое, одновременно отпустить с одной высоты, то они одновременно достигнут поверхности земли. Не должно ли более тяжелое тело упасть быстрее? Оно же получает большей импульс от земли?!

Найдем закон, по которому увеличивается импульс обоих тел. Пусть масса тяжелого тела составляет 4 кг, а легкого - 1 кг. Подставим выражение

$$F = m \cdot g$$

в формулу

$$p = F \cdot t$$

Тогда получим

$$p = m \cdot g \cdot t \quad (1)$$

В это выражение подставим массы тел и фактор места. Тогда для более тяжелого тела получим

$$p = 4 \text{ [кг]} \cdot 10 \text{ [Н/кг]} \cdot t = 40 \text{ [Н]} \cdot t$$

и для более легкого соответственно

$$p = 1 \text{ [кг]} \cdot 10 \text{ [Н/кг]} \cdot t = 10 \text{ [Н]} \cdot t$$

Обе эти $p - t$ - зависимости приведены на рис. 4.3. Согласно приведенным графикам импульсы обоих тел равномерно увеличиваются. Однако импульс более тяжелого тела возрастает быстрее, чем легкого. В каждый момент времени тяжелое тело имеет импульс в четыре раза больше, чем легкое тело.

Почему же оба тела падают одинаково быстро? Для ответа на этот вопрос надо воспользоваться формулой импульса

$$p = m \cdot v. \quad (2)$$

Отсюда следует, что для сообщения тяжелому телу определенной скорости необходим в четыре раза больший импульс, чем для придания той же скорости легкому телу. Тело с большей массой более инертно, чем тело с меньшей массой.

Этот же результат можно получить с помощью простого расчета. Приравняв правые части соотношений (1) и (2), мы получим, что

$$m \cdot g \cdot t = m \cdot v.$$

Теперь, разделив обе части на m , конечный результат:

$$v = g \cdot t. \quad (3)$$

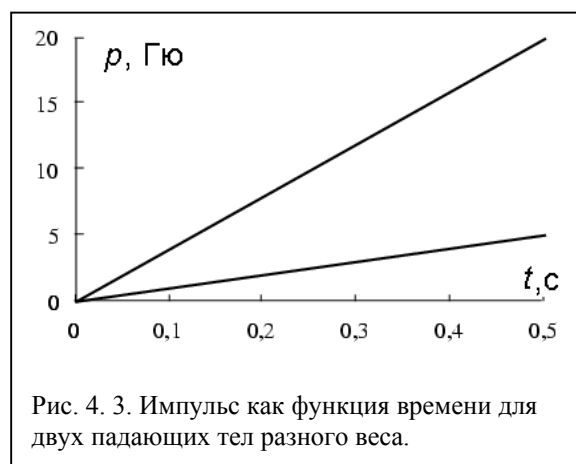
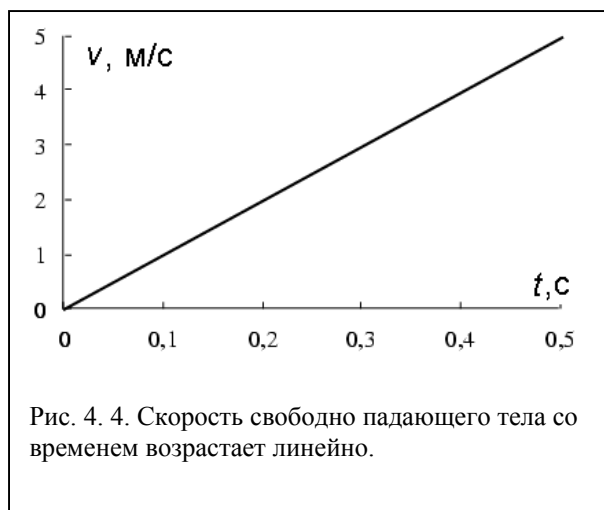


Рис. 4.3. Импульс как функция времени для двух падающих тел разного веса.



Формула показывает, что скорость падающего тела равномерно возрастает. Поскольку в нее не входит масса, то говорят, что скорость падающих тел не зависит от массы тела. На рис. 4.4. приводится зависимость от времени скорости любого свободно падающего тела.

Наличие в соотношении (3) фактора места указывает на то, что скорость свободного падения зависит от того места, где происходит это падение. На Луне, например, тела падают в шесть раз медленнее, чем на Земле.

В наших рассуждениях мы исходили из того, что падающее тело получает импульс только из земли и при падении импульс не теряется. Фактически это упрощенный подход, т.к. в действительности в результате трения о воздух падающее тело теряет импульс. Если некоторое тело является не слишком легким и пролетает короткое расстояние, то указанное упрощение вполне оправдано и такое движение называется *свободным падением*.

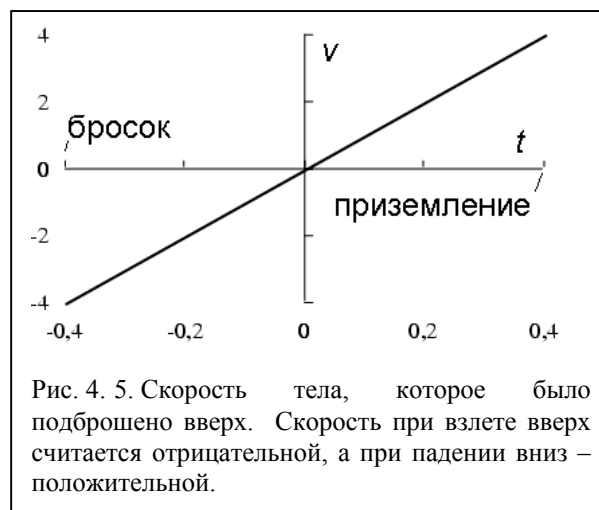
Если тело, наоборот, легкое и обладает большой поверхностью, то указанные допущения уже больше непригодны.

Для свободно падающих тел имеют место следующие утверждения:

Если тело А имеет в два раза большую массу, чем тело В, то оно получает от земли за каждую секунду в два раза больший импульс. Чтобы падать с той же скоростью, что и В, оно нуждается в удвоенном импульсе.

Скорость падающих тел возрастает равномерно.

Все тела падают одинаково быстро.

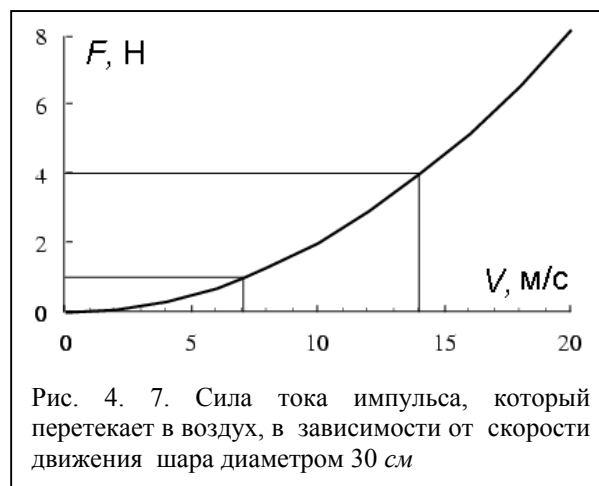


Рассмотрим один пример свободного падения: пусть тело падает не из состояния покоя, но его подбрасывают вертикально вверх. На старте оно имеет отрицательный импульс. При движении тело непрерывно получает от земли новый положительный импульс и в результате его отрицательный импульс становится все меньше и меньше: полет вверх тела замедляется, оно останавливается и, наконец, начинает двигаться в положительном направлении, т.е. вниз.

Движение вверх является при этом зеркальным изображением движения вниз. При падении вниз импульс тела равномерно увеличивается, при подъеме вверх отрицательный импульс равномерно уменьшается. То же самое можно сказать для скорости: при взлете вверх отрицательная скорость убывает линейно со временем, а при падении вниз линейно возрастает положительная скорость со временем.

На рис. 4.5 изображена зависимость скорости от времени. В качестве точки отсчета (нулевой точки) на оси времени выбран момент начала возвратного движения. Поэтому момент броска при таком отсчете находится в точке “минус 0,4 секунды”. Из рисунка также видно, что для полета вверх требуется столько же времени, сколько и для падения вниз.

На рис. 4.5 изображена зависимость скорости от времени. В качестве точки отсчета (нулевой точки) на оси времени выбран момент начала возвратного движения. Поэтому момент броска при таком отсчете находится в точке “ минус 0,4 секунды”. Из рисунка также видно, что для полета вверх



требуется столько же времени, сколько и для падения вниз.

Задачи

1. Ты прыгаешь с трехметровой вышки в воду. Свободное падение при этом продолжается 0,77 с. Чему равен твой импульс в момент достижения поверхности воды? Какова при этом твоя скорость?
2. Чему равна скорость падающего тела через 0,5 с на Земле, на Луне и на Солнце?
3. Камень бросили вверх. Его начальная скорость была 15 м/с. Через какое время он упадет на землю.
4. Камень с помощью пращи брошен вверх. Через 5 с он падает на землю. Какова была начальная скорость камня?

4.5. Падение с трением

Очень часто трением предмета о воздух нельзя пренебрегать. Как велико трение зависит от формы тела

1. скорости этого тела.

Относительно автомобиля тебе, конечно, известно, что

1. всегда для него стараются найти такую форму корпуса, при которой трение о воздух является по возможности наименьшим;
2. когда едут быстро, то преодолевают трение, и тогда намного увеличивается потребление бензина на километр пути, чем при медленной езде.

То, что трение, т.е. сила тока импульса, который передается воздуху, сильно возрастает с увеличением скорости, показано на рис. 4.6 и рис. 4.7. На них приводятся потери от трения в зависимости от скорости для обычного легкового автомобиля (рис. 4.6) и для небольшого тела, например, для мяча диаметром 30 см.

Отсюда видно, что если нет потерь на трение или ими можно пренебречь, то все тела падают одинаково быстро. Что, однако, происходит со скоростью падения, если трением нельзя пренебречь?

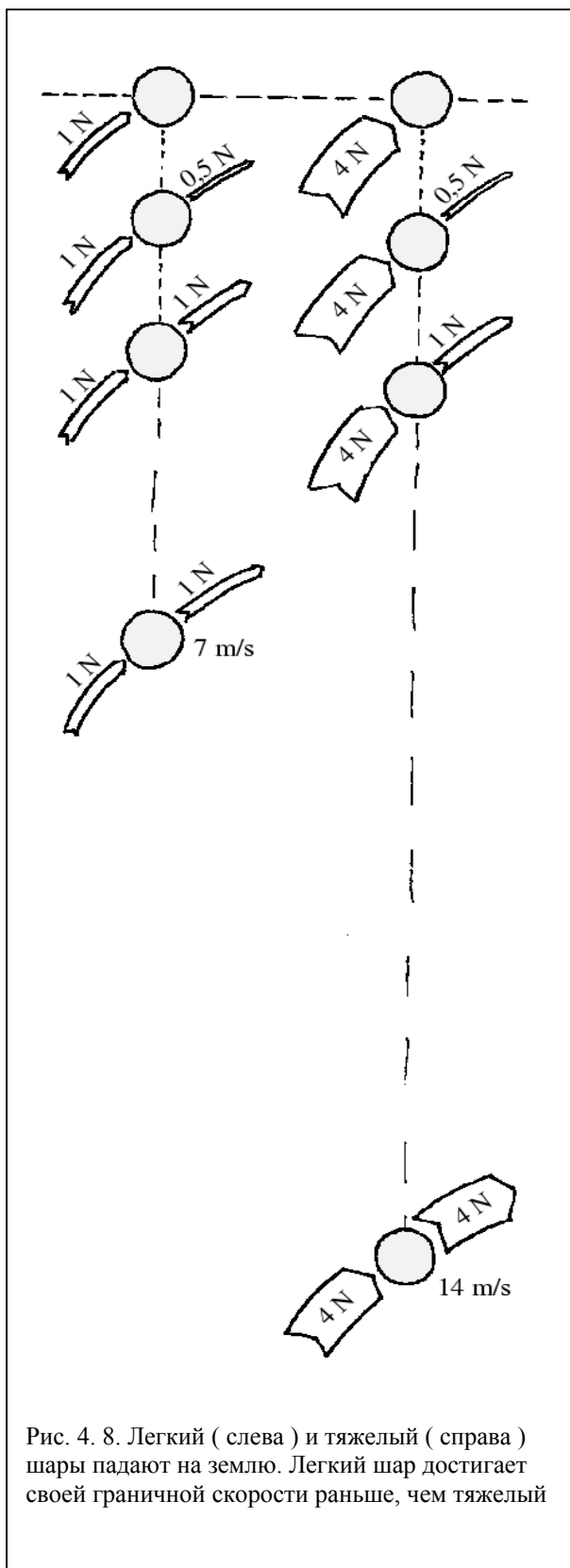
Пусть падает большой и очень легкий шар, как это изображено слева на рис. 4.8, и его масса равна

$$m = 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг},$$

а диаметр составляет $30 \text{ см} = 0,3 \text{ м}$. Из земли в шар непрерывно втекает поток импульса величиной

$$F = m \cdot g = 0,1 \text{ кг} \cdot 10 \text{ Н/кг} = 1 \text{ Н}$$

В начале падения скорость шара еще очень мала и поэтому малы также потери импульса в воздух. При скорости шара 2 м/с поток импульса, который отдается воздуху все еще не превосходит 0,1 Н (см. рис. 4.8). Потери еще малы в сравнении с потоком импульса, поступающим из земли в шар. Однако потери быстро становятся большими и вскоре шар будет отдавать воздуху в секунду такой же величины импульс, какой он получает от земли. С этого момента его импульс больше не возрастает и согласно рис. 4.8 скорость его будет около 7 м/с.



Пусть падает большой и очень легкий шар, как это изображено слева на рис. 4.8, и его масса равна

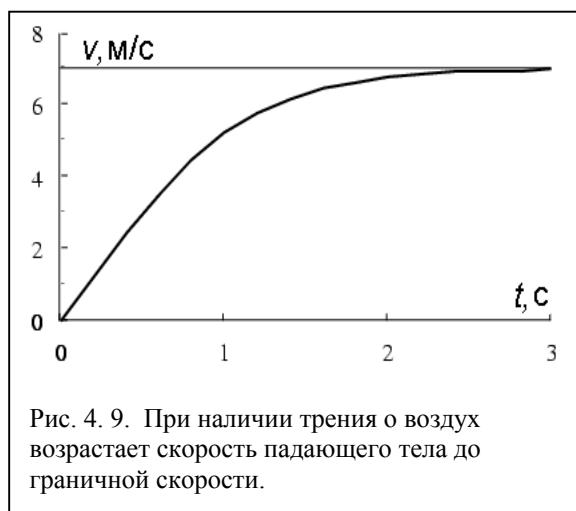
$$m = 100 \text{ г} = 0,1 \text{ кг},$$

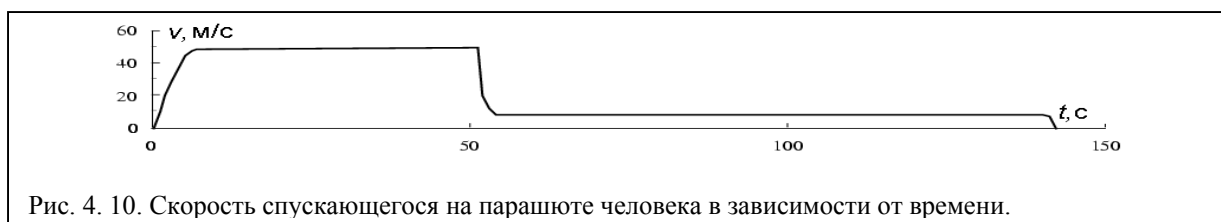
а диаметр составляет $30 \text{ см} = 0,3 \text{ м}$. Из земли в шар непрерывно втекает поток импульса величиной

$$F = m \cdot g = 0,1 \text{ кг} \cdot 10 \text{ Н/кг} = 1 \text{ Н}$$

В начале падения скорость шара еще очень мала и поэтому малы также потери импульса в воздух. При скорости шара 2 м/с поток импульса, который отдается воздуху все еще не превосходит $0,1 \text{ Н}$ (см. рис. 4.8). Потери еще малы в сравнении с потоком импульса, поступающим из земли в шар. Однако потери быстро становятся большими и вскоре шар будет отдавать воздуху в секунду такой же величины импульс, какой он получает от земли. С этого момента его импульс больше не возрастает и согласно рис. 4.8 скорость его будет около 7 м/с .

На рис. 4.9 приводится зависимость скорости нашего шара от времени: в самом начале его скорость возрастает со временем линейно и он ведет себя как свободно падающее тело. Постепенно потери возрастают. Наконец, когда втекающий и вытекающий потоки импульса становятся одинаковыми, скорость больше не возрастает. Шар при этом достиг своей *граничной скорости* и находится в состоянии равновесия потоков.





Рассмотрим теперь падение другого шара. Пусть у него будет тот же диаметр (30 см), а масса будет в четыре раза больше, чем у первого шара (см. правую сторону рис. 4.8):

$$m = 0,4 \text{ кг.}$$

Тогда из земли в шар втекает через поле тяготения поток импульса величиной

$$F = m \cdot g = 0,4 \text{ кг} \cdot 10 \text{ Н/кг} = 4 \text{ Н.}$$

При какой скорости этот шар перестанет двигаться быстрее. Обратимся опять к рис. 4.8. Поток импульса, связанный с потерями, становится равным поступающему из земли потоку импульса, когда скорость шара достигнет 14 м/с. Таким образом, тяжелый шар приходит в состояние равновесия потоков при большей скорости, чем легкий шар.

При больших скоростях нельзя пренебрегать трением воздуха.

Скорость падающего тела возрастает только до граничной скорости. Граничная скорость зависит от формы тела. Для тяжелых тел она больше, чем для легких.

Представляет интерес применение наших выводов для полета парашютиста. Выпрыгнувший из самолета парашютист за несколько секунд достигает граничной скорости равной приблизительно 50 м/с. С этой скоростью он “падает” продолжительное время. Поток импульса, который в этом случае через поле тяготения втекает в человека, равен по величине тому потоку, который вытекает из-за трения воздуха.

На расстоянии от земли приблизительно 400 м парашют раскрывают. Открытие парашюта означает, что внезапно резко возрастает трение о воздух (сопротивление воздуха). Одновременно вытекающий поток импульса становится вдруг больше втекающего потока импульса. Из-за этого уменьшается импульс парашютиста. С уменьшением импульса снижается его скорость и соответственно потери на трение о воздух. Наконец, становится поток импульса, связанный с трением, такой же величины как и поток

импульса, вызванный тяготением, но, разумеется, при относительно незначительной скорости: около 4 м/с. Парашют с подвешенным человеком медленно спускается на землю с постоянной незначительной скоростью. На рис. 4.10 приведена зависимость скорости парашютиста от времени.

Наши выводы относительно граничной скорости будут непригодны, если не будет воздуха или другой тормозящей среды. На Луне нет атмосферы и поэтому здесь действительно все тела падают одинаково быстро. Лист бумаги падает также быстро на поверхность Луны как и большой камень. Это явление можно наблюдать и на земле. Для этого опыт с падением надо проводить в сосуде, из которого выкачан воздух. Обычно это стеклянная трубка с маленькими телами очень различной массы, которые падают в безвоздушном пространстве. Как и следовало ожидать, они падают одинаково быстро.

Задача

Чему равна граничная скорость падающего шара, диаметр которого 30 см, а масса равна 0,8 кг?

4.6. Невесомость

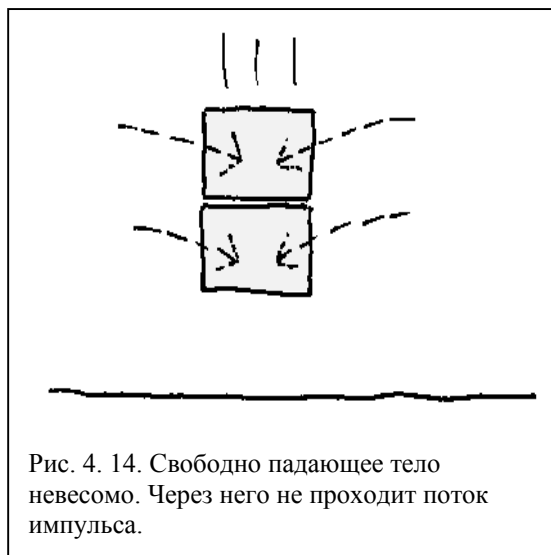
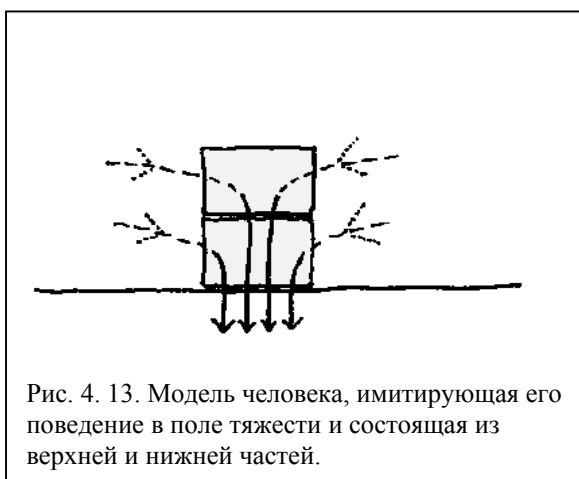
Человек на рис. 4.11а ощущает тяжесть: его тело должно удерживать тяжелую голову, его ногам приходится тяжелее всего, т.к. они должны нести все тело. Но ему приходит в голову идея (см. рис. 4.11b). В результате ноги свободны. Однако руки должны удерживать всю нагрузку. На рис. 4.11с приводится третья попытка освободиться от веса, но тоже безуспешная.





Человека на рис. 4.11 беспокоит “ощущение тяжести”. Мы попытаемся этому ощущению дать физическое определение. То, что человек чувствует во всех трех случаях, есть поток импульса, протекающий через его тело. Через каждую часть тела втекает в него импульс поля тяжести, который должен быть выведен из него и возвращен назад в землю. На рис. 4.12 эти потоки изображены для стоящего человека: импульс втекает в голову, в руки, тело и т.д. Все эти потоки должны по ногам стечь обратно в землю. Поэтому поток импульса в ногах будет самым сильным.

Для дальнейшего рассмотрения используем модель человека в виде двух брусков, лежащих один на другом: так сказать верхняя и нижняя части тела (рис. 4.13). На рисунке видно, что поток импульса через нижнюю часть нижнего бруска в два раза больше, чем через нижнюю часть верхнего бруска.



Мы хотим нашу модель человека привести в состояние невесомости: чтобы через него не протекали потоки импульса. Другими словами, в состоянии, в котором ни одна часть его тела не испытывала ни сжатия ни растяжения.

Вероятно, это произойдет, если человека очень сильно удалить от Земли в место, где поле тяготения Земли больше не чувствуется. Там не будет втекать в человека импульс поля тяжести и не будет через него протекать импульс. Это, фактически, одна из возможностей. Существует еще более простой метод: позволим импульсу втекать в тело человека и не дадим возможность ему вытекать. Тогда через человека не будет протекать импульс и он будет чувствовать себя невесомым.

Но как это можно себе представить? Совсем просто. Поскольку импульс из человека не вытекает и тем самым не возвращается в землю, остается принять, что разрывается связь с землей. Таким образом, мы должны оставить человека свободно падающим (рис. 4.14). В этом случае из поля тяготения втекает импульс в каждый брусок (в каждую часть человека) и в любое его место. Но он втекает в бруски не со всех сторон. И что важно - он не втекает из одного бруска в другой. Результатом является то, что больше нет ни давления ни напряжения. Нижний брусок не чувствует давления лежащего на нем бруска. Для тебя, т.е. настоящего человека, пригодны все эти выводы: если ты откуда - то прыгаешь вниз, то пока летишь находишься в состоянии невесомости. Даже когда ты прыгаешь вверх,



Рис. 4.15. Во время свободного падения оба бруска невесомы. Зажатая дощечка легко вынимается.

будешь в состоянии невесомости пока у тебя утрачен контакт с землей и пока не коснешься ее поверхности.

Рассмотрим падение в воздухе такое быстрое, что состояние невесомости трудно даже заметить. Для этого сделаем опыт с модельным человеком, приведенный на рис. 4.15. Пусть оба бруска стоят на платформе, подвешенной с помощью тросов наподобие чашки весов. Между верхним и нижним брусками находится тонкая дощечка, которая привязана к стене тонким натянутым резиновым шнуром. Этот шнур может вытащить дощечку, если ее не прижимает своим весом верхний брусок.

Сделаем теперь следующий эксперимент: перережем трос, на котором подвешена платформа. В тот же момент наше устройство выстрелит дощечкой, энергично вытянутой резиновым шнуром. Почему? Башенка из брусков в течении очень короткого времени свободно падала. И в это же время она была невесомой. Верхний брусок не давил на нижний, из-за чего дощечку можно было вытащить.

Тебе известно, что космонавты в космическом корабле находятся в состоянии невесомости. Как это можно объяснить? Тем, что они находятся далеко от земли? Вовсе нет. Космический корабль Шаттл летал на высоте 250 км. По сравнению с радиусом Земли эта высота очень мала. Корабль фактически летел очень близко к поверхности земли (рис. 4.16). Поле тяжести здесь приблизительно такое же как и у нас внизу: фактор места на высоте 250 км составляет $g = 9,64 \text{ Н/кг}$, что не намного меньше фактора на поверхности земли.



Рис. 4. 16. Космический корабль Шаттл летит на высоте 250 км. Фактор места здесь чуть меньше, чем на поверхности земли.

Поэтому объяснение невесомости должно быть совсем другим. Оно оказывается тем же, что и найденное для падающих тел. Космический корабль становится свободно падающим телом после того как в ракетопосителе сгорит все топливо. Почему же корабль или спутник не падают прямо на землю. Дело в том, что он имеет очень большой импульс в горизонтальном направлении. То есть он падает как горизонтально брошенный камень; только падает настолько вперед, насколько “летит прямо к земле”. Таким образом, он “падает” по окружности и никогда не достигает поверхности земли, т.е. падает на землю, пролетая мимо нее.

Свободно падающие тела невесомы.

Задачи

1. Космонавт наблюдает в космическом корабле два одинаковых тела разной массы. Может ли он определить какое из них имеет большую массу и если да, то как это можно сделать?
2. Космический корабль настолько далеко находится от Земли, что практически не испытывает ее притяжения. Космонавтам хочется почувствовать свой вес. Что им надо сделать, не двигаясь к Земле или другим небесным телам?

4.7. Плотность вещества

“Что тяжелее: 1 кг железа или 1 кг древесины?” Всякий задающий этот вопрос старается кого-то поставить в тупик. Правильный ответ, разумеется, следующий: “Оба одинаково тяжелы.” Если, однако, кто-то невнимателен или прослушает слово “кг”, то скорее всего скажет, что железо тяжелее.

Здесь надо учитывать, что слова “тяжелый” и “легкий” могут употребляться в двух различных смыслах:

- во-первых, чтобы сравнить вес или массу: 1,5 кг сахара тяжелее, чем 0,8 кг муки;
- во-вторых, чтобы обратить внимание на свойства вещества: говорят, что железо тяжелее древесины, т.к. кусок железа имеет большую массу, чем кусок древесины того же объема.

Эти два значения оценочных понятий “тяжелее” и “легче” можно количественно выразить с помощью *плотности* вещества. Под плотностью ρ некоторого вещества понимается отношение его массы m к занимаемому объему V , или короче, масса вещества в единице объема:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

В системе единиц СИ плотность имеет размерность $\text{кг}/\text{м}^3$. В таблице 4.2 приведены плотности некоторых веществ.

Здесь надо иметь в виду еще следующее: некоторые вещества, а именно газообразные, легко сжимаются. Поэтому их плотность можно легко менять, увеличивая или уменьшая давление или температуру. Если дана плотность, то надо указать при каком давлении и температуре она определена. Для твердых и жидких веществ этот эффект обыкновенно очень мал. Табличные значения приводятся для *нормальных условий*, т.е. при давлении $p = 1 \text{ бар}$ и температуре $\vartheta = 20^\circ \text{C}$. Бросается также в глаза, что плотности газов значительно меньше плотностей жидкостей и твердых веществ. Это мы можем сформулировать в виде следующего правила:

При нормальных условиях плотность жидкостей и твердых веществ приблизительно в 1000 раз больше, чем у газов.

Чтобы измерить плотность вещества, берут любое количество этого вещества, определяют его массу m и объем V , а потом делят m на V .

Иногда измерения m и V достаточно просты, а иногда весьма сложны. Например, чтобы измерить плотность бензина, достаточно налить 1 л = 0,001 м³ жидкости и взвесить. При этом получается, что $m = 0,72 \text{ кг}$, а для плотности находим

Таблица 4.2. Плотности некоторых веществ при $p = 1 \text{ бар}$ и $\vartheta = 20^\circ \text{C}$

	$\rho \text{ (кг/м}^3\text{)}$
Буковая древесина	600 - 900
гранит	2600
алюминий	2700
железо	7800
медь	8960
золото	19300
бензин	720
этанол (обычный алкоголь)	790
вода	998
трихлорэтилен	1460
ртуть	13550
водород	0,090
азот	1,25
воздух	1,29
кислород	1,43
диоксид углерода (углекислый газ)	1,9

$$\rho_{\text{бензин}} = \frac{0,72}{0,001} \text{ кг/м}^3 = 720 \text{ кг/м}^3$$

Определение объема для твердых веществ является более трудной задачей, т.к. часто твердые тела имеют сложную форму (рельеф). На рис. 4.17 показано, как поступают в таких случаях. Тело погружают в воду и смотрят насколько повысился ее уровень, т.е. какой объем воды был вытеснен этим телом.

Нахождение плотности газов затруднено из-за сложности определения их массы. Пусть, например, надо найти плотность воздуха. Возьмем хорошо закрывающийся сосуд с воздухом объемом 1 л и взвесим его. Потом с помощью вакуумного насоса откачаем воздух из этого сосуда и опять взвесим его. Разность результатов двух взвешиваний даст массу воздуха, который вначале находился в сосуде.

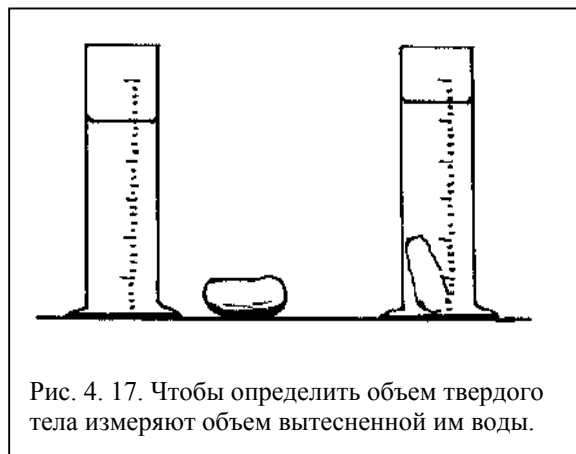


Рис. 4.17. Чтобы определить объем твердого тела измеряют объем вытесненной им воды.

Задачи

1. При взвешивании 1,6 литра некоторой жидкости ее масса оказалась равной $m = 1,3$ кг. Какова плотность жидкости?
2. Масса гранитного булыжника составляет 2,2 кг. Чему равен его объем?
3. Емкость бензобака автомобиля равна 40 л. Сколько весит бензин в полностью залитом баке?
4. Медная пластинка длиной 120 см и шириной 80 см весит 8,2 кг. Какова толщина этой пластинки?
5. Чему равна масса воздуха в твоей комнате?

4.8. Когда тела плавают и когда тонут

Кусок дерева, немного бензина или капелька масла плавают на воде. Кусок железа, меди или алюминия тонут в воде. А капелька воды в воде: плавает или тонет? Ты, наверно, подумаешь, что это бессмысленный вопрос. Ведь капелька воды ничем не отличается от остальной воды! Однако совсем нетрудно капельку сделать непохожей: ее надо просто окрасить. Результат: она не плавает и не тонет, она висит.

Будет ли некоторое тело плавать в жидкости зависит от того насколько оно тяжело. Но в каком смысле здесь говорится “тяжелое” или “легкое”? Ясно, что речь не идет о массе: кусок дерева плавает на воде независимо от его массы. Скорее имеет значение плотность тела. Тело плавает в жидкости, если его плотность меньше плотности этой жидкости. Если его плотность больше, то оно тонет, а если у них плотности одинаковы, то оно висит, т.е. как бы парит в жидкости.

(Слово тело здесь мы используем в расширенном смысле: им может быть и некоторое количество другой жидкости.)

Проверим наше утверждение еще раз для воды и бензина. Если капнуть капельку воды в сосуд с бензином, то она опустится вниз. Если капнуть бензин в сосуд с водой, то он растечется по поверхности воды.

Очевидно в обоих случаях речь идет об одном и том же явлении. Это особенно ясно будет видно, если проделать следующий эксперимент. В стеклянный сосуд наливают



Рис.4.18. Семь тел (жидких и твердых) упорядочились по плотности.

несколько жидкостей с разными плотностями, например, трихлорэтилен, воду и бензин.

Жидкости разделяются на слои таким образом, что жидкость с наибольшей плотностью находится внизу, над ней располагается жидкость с меньшей плотностью и т.д. (см. рис. 4.18). В сосуд можно поместить также несколько твердых предметов. Кусочек металла опускается на дно; тело из эбонита ($\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$) будет плавать на поверхности трихлорэтилена и не в коем случае не на воде. Масло ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$) будет плавать на поверхности воды, но не на поверхности бензина. Наконец, кусок дерева будет плавать на самом верху на поверхности бензина. Таким образом семь различных веществ упорядочились по величине их плотности.

У газов плотность значительно меньше, чем у жидкостей, и поэтому все они “плавают” на жидкостях. Пузырьки воздуха в воде или пузырьки углекислого газа в газированном напитке поднимаются наверх.

До сих пор мы спрашивали какие тела плавают в жидкостях. Но этот вопрос можно поставить и для газов. Понятно, что все жидкие и твердые вещества падают в газах: капельки воды или твердые частички опускаются в воздухе вниз. Но при этом один газ может “плавать” на другом. Это явление используется для воздушных шаров. Если шар заполнить газом, плотность которого меньше плотности воздуха, например, водородом, то тогда шар будет подниматься наверх (оболочка шара не должна быть слишком тяжелой, т.к. тогда надо будет прибавить еще водорода). Управляемые дирижабли, которые были распространены в начале прошлого столетия, действовали именно по этому принципу. Сделаем следующий вывод:

тело, плотность которого меньше плотности окружающей среды, поднимается вверх. Если его плотность больше, чем у окружающей среды, то оно падает вниз.

Задачи

1. Существует ли жидкость, в которой железо может плавать? Ответ обоснуйте.
2. Воздушный шар заполнен углекислым газом. Будет он подниматься или опускаться? Ответ обоснуйте.

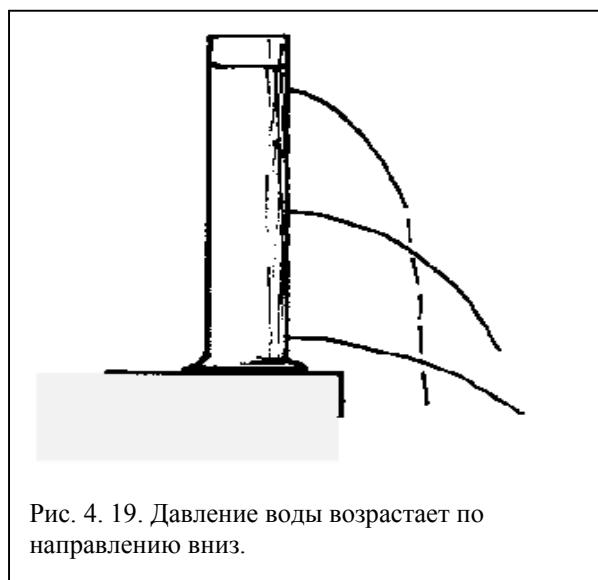
4.9. Связь между давлением и высотой в жидкостях и газах

Когда ныряют в воду, то ощущают “давление в ушах”; то же самое бывает при подъеме или спуске в скоростном лифте в очень высоком здании.

В обоих случаях меняется давление, на что чутко реагирует такой орган чувств как уши.

Заполним водой высокий сосуд, в боковой поверхности которого на различной высоте имеются отверстия (рис. 4.19). Вода вытекает из всех трех отверстий. Давление, которое вынуждает воду вытекать, называется *давлением тяготения*, т.к. является результатом веса воды или потому что вода тяжелая. Струя воды из нижнего отверстия бьет дальше всего. Поэтому давление тяготения там должно быть больше всего. Струя воды из верхнего отверстия бьет ближе всего и, соответственно, давление тяготения здесь меньше всего. Таким образом, давление тяготения воды возрастает сверху вниз.

Указанное увеличение давления можно измерить и при этом оказывается, что при погружении в воду на каждые 10 м давление тяготения прирастает на 1 бар. Самое глубокое



место в океане имеет глубину около 10 000 м и давление там составляет 1000 бар. Теперь тебе будет понятно, почему погружаемые на глубину аппараты должны иметь очень толстые стенки.

Некоторые электростанции имеют устройство, схематически приведенное на рис. 4.20. В горах на большой высоте располагается водохранилище, где накапливается вода, поступающая из различных рек и ручейков. Это водохранилище соединяется несколькими толстыми трубами с электростанцией, которая находится внизу в долине. По ним вода поступает в турбины, соединенные с генераторами. Если хранилище находится на высоте 500 м, то давление воды на входе в турбину составляет 50 бар.

Сходное явление, т.е. увеличение давления при увеличении глубины, наблюдается и для земной атмосферы, или другими словами: в “воздушном океане”, который окружает землю. На дне такого “океана”, т.е. на поверхности земли, давление тяготения, как ты знаешь, достигает 1 бар. Оно уменьшается с увеличением высоты вблизи поверхности земли приблизительно на 1 мбар на каждые 10 м. Сверху вниз на больших высотах уменьшается не только давление, но также изменение давления для одинаковой разницы высот (см. раздел 2.2).

Давление тяжести в жидкостях и газах возрастает сверху вниз.

