

ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

План действий

В предыдущем разделе («Кинематика») вы познакомились с тем, как происходят самые простые движения (*равномерное и равноускоренное*) самых простых тел - тех, которые можно считать *материальными точками*.

Теперь настало время перейти от вопроса “Как это происходит?” к гораздо более интересному вопросу: *Почему* это происходит? И почему это происходит именно так, а не иначе. Почему тело вдруг “решает” изменить свою скорость?

По-гречески **dynamis** - это **сила**. Понятие *силы* будет играть главную роль в событиях этой главы.

Иногда тела меняют свою скорость вроде бы без всяких видимых причин. Чтобы разобраться в такой ситуации, нам придется обратить внимание на свойства *систем отсчета* (с.о.). В предыдущей главе, честно говоря, они нам были безразличны - что та система отсчета, что эта. Теперь мы будем более требовательными.

И лишь убедившись в наличии нужной нам с.о., мы перейдем к главному - *законам движения тел*.

Как и раньше, все наши рассуждения будут справедливы для таких реальных тел, которые можно считать *материальными точками*.

Закон инерции

Инерциальные системы отсчета

Законы Ньютона

Сила

Инертная масса

Динамика вращательного движения

Принцип относительности Галилея

ЗАКОН ИНЕРЦИИ ГАЛИЛЕЯ

1. От Аристотеля до Галилея

Почему тела движутся? - люди очень давно задумывались над этим. Об этом любили рассуждать *древние греки*. Наиболее распространенной была точка зрения *Аристотеля*. Он считал, что *естественным* состоянием тела является только *покой*.

А все, что находится в *движении*, движется благодаря воздействию другого. Если же внешних воздействий нет, то тело должно остановиться, перейти в свое естественное состояние.

В самом деле: вы продолжаете утром изображать спящего человека (самое естественное состояние!), пока мама или бабушка вас не разбудит. Футбольный мяч лежит спокойно, пока по нему не ударит нога футболиста.

Один вопрос: покой по отношению к чему? Ведь относительно нервничающего вратаря мяч, установленный для штрафного удара, будет двигаться!

Конечно же, *Аристотель* имел в виду покой *относительно Земли*. (Для древних греков окружающий мир был устроен как бы вокруг Земли, именно она была в центре этого мира.)

Точка зрения Аристотеля продержалась почти две тысячи лет. Лишь во времена итальянского Возрождения *Николай Коперник* выдвинул *гипотезу* о том, что наша Земля - лишь одно из многих небесных тел, планет, вращающихся вокруг Солнца.

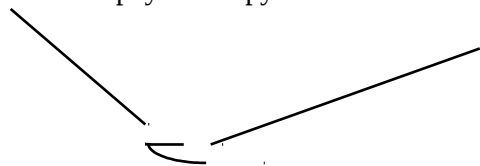
А в 1564 году в Италии родился будущий первый физик *Галилео Галилей*. (Аристотель и все его последователи были философами.) Галилей впервые сформулировал основное “правило игры” в науке, названной потом физикой: *опыт, эксперимент* - единственный *критерий* истины. Но использовать этот критерий для проверки или опровержения утверждения Аристотеля - *без внешних воздействий нет движения тел* (по отношению к Земле) - было невозможно. Потому что невозможно совсем избавиться от внешних воздействий: все тела погружены в воздух, они притягиваются к Земле и друг к другу, есть трение и т.д. Можно было бы попытаться в эксперименте *скомпенсировать* действие нескольких внешних причин... Тогда Галилей предложил новый прием - *мысленный эксперимент*.

2. Опыты Галилея

Начнем с *реального* эксперимента.

РИС

Возьмем горку с контрсклоном и станем пускать с ее вершины вниз по склону шайбу.



Горка должна быть как можно более гладкой, чтобы уменьшить внешнее влияние ее бугорков и впадин. Хорошо бы, например, сделать ее ледяной, но очень ровной.

Начинаем реальный эксперимент. Сначала возьмем три разных шайбы (пластилиновую, настоящую каучуковую и ледяную) и поочередно пустим их соскальзывать вниз. Последим за высотой, на которую заберется шайба. Для ледяной шайбы конечная высота примерно равна ее начальной высоте, для каучуковой - поменьше начальной, а для пластилиновой она заметно меньше начальной.

А теперь - *мысленный* эксперимент.

РИС

Будем мысленно уменьшать внешнее воздействие на шайбу со стороны поверхности горки. Тогда - при отсутствии такого действия (нет трения!) конечная высота шайбы будет в точности равна ее начальной высоте.

Обратите внимание: реально мы не делали самого эксперимента, мы лишь представили его себе мысленно и представили себе его результат, исходя из результатов предшествующего реального опыта, из нашего разума и логики. Мы как бы продлили реальный опыт до предела, до предельного случая, который нам невозможно реализовать на практике, но можно домыслить.

Продолжим реальный эксперимент. Опыт №2:

РИС

пускаем вниз с одной и той же горы *ледышку* несколько раз, каждый раз уменьшая угол контрсклона.

Обратите внимание: чтобы достичь начальной высоты, шайбочка вынуждена укатываться по контрсклону все дальше и дальше.

А теперь решающий мысленный эксперимент (и уже понятно какой, правда?).

РИС

Все более *выползающая* контрсклон, мы все дальше позволяем укатываться ледышке. В *пределе*, когда наш идеально гладкий контрсклон превратится в плоскость, шайба будет скользить по ней сколь угодно далеко (если ее, конечно, не остановят).

Но как будет двигаться ледышка по плоскости? Равномерно! С той скоростью, которую она приобрела к концу спуска и к началу выхода на плоскость.

Итак, по гладкой плоскости идеальная шайба скользит, не меняя своей скорости. С другой стороны, похоже, что на такой плоскости внешние воздействия на шайбу практически отсутствуют или скомпенсированы. Почему?

Смотрите сами: трение ужасно мало, сопротивление воздуха движению шайбы тоже мало - шайба маленькая и приплюснутая. Конечно, нам никуда не деться от притяжения Земли, но оно в точности компенсируется реакцией самой плоскости на давящую на плоскость шайбу - ведь иначе шайба либо проваливалась, либо подскочила, а она по вертикали вообще никуда не движется!

3. Закон инерции

И вот какой получается вывод:

если на тело (материальную точку!) не действуют никакие тела или если действие этих тел скомпенсировано, то скорость такого тела не меняется (ни по величине, ни по направлению). Это и есть знаменитый **закон инерции Галилея**.

Верно и обратное:

если известно, что скорость некоторого тела не меняется (ни по величине, ни по направлению - т.е. оно движется равномерно и прямолинейно), то можно утверждать, что силы, действующие на него, скомпенсированы (или их вообще нет - с заданной степенью точности).

По Галилею получается, что покой ничем не отличается от равномерного прямолинейного движения.

Вот известный **пример** - это случай с двумя поездами.

РИС Пассажир в вагоне поезда видит в окне стоящий на соседнем пути другой поезд. Медленно начинается движение второго поезда. Входит второй пассажир: - Ну что, мы поехали? - Это *они* поехали, а мы опять стоим. - На этот раз вы ошибаетесь (жестом указывает в противоположное окно). Первый пассажир оборачивается и видит удаляющуюся вывеску станции.

Заметим на будущее, что слова “скорость тела не меняется” равнозначны словам “ускорение тела равно нулю”.

Критерий истины в физике - опыт. Как проверить истинность закона инерции? Впрямую - никак: невозможно добиться *точной* компенсации всех сил. Но можно проверить *следствия* из него. Например: во всех случаях, когда тело меняет свою скорость по величине или по направлению, можно найти какую-то свою причину, свое внешнее воздействие, отвечающее за это изменение.

РИС

После удара (попытки) бейсбольный мяч падает в руки игрока с все нарастающей скоростью. Здесь виновата гравитация - притяжение мяча Землей.

Спортсмен раскручивает спортивный молот перед метанием. Скорость молота меняется по направлению - виновата ручка молота, она мешает ему улететь без изменения направления - прямолинейно. Если бы ручка вдруг сломалась, то произошло бы вот что...

РИС

В полном соответствии с законом инерции.

Санки, съезжающие с горы, все-таки останавливаются - виновато сопротивление воздуха и трение о снег.

Между прочим, “**инерция**” по латыни значит “бездействие”. В физике этим термином обозначают **всеобщее свойство любых тел сохранять свою скорость**. Без всяких причин!

Обратите *внимание*: тела не *стремятся* сохранять свою скорость, а просто ее *сохраняют*! Если тело вывести из состояния покоя, то оно вовсе не стремится туда вернуться. Наоборот: при малейшем внешнем воздействии тело начинает менять свою скорость - приобретает или терять.

Итак, если угодно, нет никакой *причины* для поддержания телом *постоянной скорости*; как мы скоро убедимся, только *изменение скорости* всегда имеет причину.

В: Когда жил Галилей: до Ивана Грозного или после?

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

На всякий случай напомним, что такое *система отсчета* - это тело отсчета, система координат (“линеек”) и “часы”:

С.О. = Т.О. + С.К. + <символ часов: кружок со стрелками>

Тело отсчета - то, которое мы считаем неподвижным в данной ситуации. Чаще всего это Земля.

Нетрудно заметить, что *закон инерции Галилея выполняется не в любой с.о.* Вот простой пример.

РИС

На столе в комнате *неподвижно* лежит яблоко. Оно находится в покое. Относительно чего? Правильно, относительно стола, иначе говоря, в лабораторной с.о. А если вы пробежите мимо стола, то относительно вас яблоко будет двигаться. Конечно, *пока вы бежите с постоянной скоростью по прямой, то движущееся относительно вас яблоко ничем не отличается от покоящегося относительно стола - закон инерции Галилея!* Но если вы начнете менять свою скорость - ускоряться или бежать по кривой, то моментально яблоко получит ускорение - относительно вас. Но мы знаем, что ускорение тела - свидетельство того, что на него кто-то или что-то действует, причем эти действия некомпенсированы. Кто??? Ведь вся физическая ситуация для яблока осталась абсолютно прежней. *Мы просто поменяли точку зрения на происходящее.* Возможно, мы сделали это (перешли из одной - лабораторной - с.о. в другую - вашу с.о.) *мысленно*. Как же это могло привести к появлению какого-то нового воздействия на яблоко? Конечно никак!

Вывод: в вашей с.о. закон инерции не выполняется. Таких систем отсчета, как “ваша”, можно придумать сколько угодно:

Например, это может быть люстра в лабораторной комнате, которая вдруг сорвалась с крюка на потолке и, набирая скорость, проваливается в тайный лабораторный люк. Относительно этой люстры, яблоко будет двигаться с ускорением вверх. Поэтому можно сделать очень *общий вывод:*

все системы отсчета можно разделить на два вида: такие, в которых выполняется закон инерции - их называют инерциальными, и такие, в которых этот закон не выполняется - неинерциальные.

Как определить, является ли данная с.о. инерциальной? Нужно просто поставить эксперимент: взять какое-то тело, создать для него ситуацию, когда внешних воздействий нет (это невозможно) или почти нет (все другие тела очень далеко), или (что более реально) внешние воздействия скомпенсированы, и проверить - будет наше тело менять свою скорость или нет. Если не будет - значит мы работали в и.с.о.

Можно представить, как будто мы - покупатели в физическом магазине и задать вопрос: *какие системы отсчета лучше инерциальные или неинерциальные?*

На такой вопрос физики обычно отвечают - в одной задаче одно лучше, в другой - другое. Однозначно сказать невозможно. Но все-таки и.с.о. - более *естественные* системы отсчета. Согласитесь, что как-то приятнее и понятнее, когда причина изменения состояния тела - это реальное действие ноги, Земли, пружины, бугорков поверхности стола и т.д., а не мистическое изменение *точки зрения* на поведение тела.

В дальнейшем мы, как правило, будем иметь дело именно с “хорошими”, инерциальными системами отсчета. Наша главная надежда - что в таких с.о. и законы движения будут выглядеть проще, удобнее для нас.

В: Что общего у и.с.о. и м.т. (материальной точки)?

О: И то, и то, строго говоря, не существует в природе, оба эти понятия - *идеальные модели*. Ведь, считая автомашину материальной точкой, например, в задаче о времени ее путешествия из Петербурга в Москву, мы все-таки немножко грешим против истины, пренебрегая размерами машины. И не можем не грешить: любое измерение мы всегда делаем с какой-то неточностью, погрешностью.

Так же и с и.с.о. *Невозможно совсем выключить любое действие окружающих тел*. Пусть очень маленькое, но оно всегда есть. *Невозможно абсолютно точно скомпенсировать внешние воздействия* - всегда это будет верно лишь с какой-то точностью. Поэтому: *любая с.о., которую мы приняли за и.с.о., более или менее близка к идеалу.*

В большинстве случаев мы будем пользоваться земной, лабораторной с.о., и обычно нам будет этого хватать. Но есть задачи, в которых используют с.о., где тело отсчета - Солнце.

РИС

Она ближе к идеалу, чем земная, *геоцентрическая*. (Почему?)

А система отсчета, связанная с удаленными от нас звездами, еще точнее, еще ближе к идеально инерциальной.

Если про какую-то с.о. известно, что она инерциальная, то всякая другая, движущаяся с постоянной скоростью относительно заведомо инерциальной, тоже будет и.с.о. Это следует из закона инерции Галилея.

В: Почему?

Почему не падает вращающийся волчок

РИС

В самом деле, даже если волчок вращается под некоторым углом к вертикали, он не падает при попытках его уронить. И чем быстрее вращается, тем труднее его «уложить». Почему? Какая сила мешает этому? Разве сила тяжести на него не действует? Честно говоря, теория движения волчка не проста. Укажем лишь основную причину явления. Это инерция. Каждая точка волчка движется по окружности в плоскости, перпендикулярной оси вращения. И любая частица в любой момент стремится «сойти» с этой окружности на прямую, касательную к окружности. Но всякая такая касательная тоже лежит в той же плоскости. Иначе говоря, все плоскости волчка, перпендикулярные его оси, стремятся сохранить свое положение в пространстве. А значит, и ось вращения волчка стремится сохранить свое направление.

ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

Теперь, когда мы с вами подготовили фундамент, можно, пожалуй, ввести **самое главное, что есть в динамике** - законы Ньютона.

В 1642 году умер великий *Галилей*. Но воистину природа не терпит пустоты - спустя несколько месяцев родился гениальный *Исаак Ньютон*. Ему было **17 лет**, когда он сформулировал свою мечту, свою программу действий: *Вывести два или три общих начала из явлений и после этого изложить, каким образом свойства и действия всех телесных вещей вытекают из этих явных начал...* Вдумайтесь: два или три начала (т.е. постулаты, как в геометрии, но опирающиеся на наблюдаемые явления, на опыты) - и такие, чтобы из них можно было вывести действия *всех тел!* Вот программа, достойная гения!

ОПЫТЫ (природные явления)→**НАЧАЛА** (основные законы)→**ДЕЙСТВИЯ** (движение любых тел)

Впрочем, кто из нас в юности не строил наполеоновских планов?

Разницу между обычными людьми и гением продемонстрировал Ньютон: Ему было **23 года**, когда эта программа была выполнена полностью: Ньютон сформулировал свои знаменитые законы движения.

Самое поразительное в этих законах - сочетание их простоты (*три* начала!) с почти необъятной широтой (действия *всех тел!*). От электрона в телевизоре до нашего Солнца и далеких звезд, куда даже луч света добирается за миллионы лет - все это разнообразие тел в своем движении подчиняется одним и тем же законам.

1. От Галилея к Ньютону

Ньютон принял эстафету от Галилея не только по времени своего рождения. Он сумел оценить его главный научный результат - *закон инерции*. Надеюсь, вы не забыли, что *тело, свободное от действий других тел, движется с постоянной скоростью*:

Закон инерции Галилея:

действие других тел=0 → v=const (величина и направление!)

Именно этот закон взял Ньютон в качестве фундамента, возводимого им здания классической механики.

В самом деле: *нет действия других тел - скорость не меняется*. Что из этого следует? Самое логичное, наверно:

есть внешнее воздействие - скорость тела меняется!

Или еще короче: **действие других тел → ускорение тела**

(логическое следствие закона инерции Галилея).

Галилей стал первым физиком, записавшим первые параграфы в “Правила игры в Физике” (не на бумаге, конечно!). Помните? - *конечный критерий истины - опыт; мысленный эксперимент - тоже способ исследования природы...* Ньютон и здесь продолжил линию Галилея. Вот мысль, впервые четко сформулированная Ньютоном:

основные физические законы должны быть высказаны на языке математики.

Иначе говоря, физические законы - это некоторые соотношения между физическими величинами, справедливые при определенных условиях.

2. СИЛА

Именно поэтому Ньютон вместо интуитивно ясного, но слишком расплывчатого понятия “действие одних тел на другие” ввел количественную характеристику - “силу”.

Сила - количественная характеристика взаимодействия тел.

Разумеется, это еще *не определение*. Это скорее *подход* к будущему определению. Здесь обозначены два момента:

- силы не являются чем-то самостоятельным, независимым от материальных тел; они создаются телами и действуют тоже на тела;

- при этом сила выступает как *количественная* мера интенсивности взаимодействия тел, а значит силу следует определить так, чтобы ее можно было измерить.

Можно сказать, что сила - это физическая величина. Вспомните:

" **Физическая величина** - характеристика явления или объекта, допускающая *количественное* выражение.

...Существуют два способа дать **определение физической величины**.

Первый (*математический*): через использование математических соотношений между уже введенными физическими величинами...

... и другой способ (*операциональный*): указывается процедура (последовательность действий) измерения данной величины и эталонный физический объект, принимаемый за единичное значение.

Введем **операциональное определение силы**. Как это сделать? Видимо, нужно выбрать какое-то изменение, происходящее с тем телом, на которое действует сила. И в определении связать это изменение с величиной силы. Казалось бы, самое простое - использовать изменение скорости тела под действием силы. **Но:** фактически это означало бы, что мы измеряем силу через измерение ускорения тела, правда? А ведь наша главная задача - установить физический закон, как-то связывающий силу с ускорением. Для этого необходимо *определить* силу *независимо* от определения ускорения: силу - одним образом, через изменение одних величин, а ускорение - через другие величины. Ускорение мы уже определили - через изменение скорости и время. Поэтому силу следует определять как-то иначе. Как?

Для определения силы обычно используют такой известный из опыта факт: одни тела, действуя на другие, могут их *упруго деформировать*, т.е. менять их форму и размеры. (*Упругая деформация* - такая, которая исчезает после прекращения действия силы.) Иначе говоря, действующая сила может приводить к деформации тела. Простейший пример - растянутая (или сжатая) пружина.

РИС (*вертикальная пружина, закрепленная сверху и растянутая рукой снизу*)

(Отметим сразу, что *сила* может вызвать только *ускорение* тела, но если ускорения отдельных частей тела в какой-то момент отличаются друг от друга, то эта неоднородность ускорений приводит к деформации тела. Подробнее об этом - в разговоре про *упругую силу*.)

Пойдем по этому пути.

Определение силы

(ответ на вопрос: как измерить силу и каковы ее основные свойства)

а) В качестве эталона измерения силы выберем определенную пружину. За единицу измерения силы примем силу, сжимающую или растягивающую эту неподвижную пружину на определенную (единичную) величину.

б) Две силы принимаются равными по величине и противоположными по направлению, если они, одновременно действуя на тело, не сообщают ему ускорения.

в) Градуировка пружины (динамометра). Чтобы иметь возможность измерить *любую* силу, необходимо выяснить - какие деформации соответствуют другим (не единичным) силам - и проставить на динамометре соответствующие числа (это и есть градуировка).

Возьмем *три* эталонных пружины и на опыте убедимся, что они складываются по правилу параллелограмма:

РИС

Действие двух эталонных сил F_0 уравнивается горизонтальной силой $F=2 F_0 \cos \alpha / 2$. Тело остается в покое! С помощью последнего равенства (меняя α и F_0) мы и проградуируем наш динамометр.

Заодно мы убедились, что **сила - векторная величина**. Получить этот вывод путем логических рассуждений, без эксперимента, невозможно.

Еще раз подчеркнем. На первый взгляд кажется: чтобы задать силу, действующую на какую-то частицу, нужно задать не только величину силы, но и ее направление. (*Кстати, а это откуда известно?*) Этот факт и означает, что сила - вектор (а не скаляр).

Так? Нет, не так! Человек, надевший футболку и бутсы и вышедший на футбольное поле, - не обязательно профессиональный футболист. Прежде всего - надо уметь общаться ногами с мячом. (А футболку выдадут.)

Так вот: вектор - это, прежде всего, геометрическое сложение (по правилу параллелограмма). Поэтому фактически мы спрашивали: откуда известно, что силы складываются по правилу параллелограмма? Ответ: из опыта, **это экспериментальный факт**.

Итак,

мы определили понятие "сила" *независимо* от определения ускорения (через деформации твердых тел); и

мы экспериментально установили, что сила - вектор;

Разложение сил-1

Под парусом против ветра

В: *Может ли парусное судно идти против ветра?*

О: Прямо против ветра – не может. Может только под некоторым, пусть небольшим, углом.

РИС

Ветер толкает парус всегда под прямым углом к плоскости паруса.

(Сила трения о ткань паруса мала).

Перельман, Ф-2, с.32, рис 17

РИС рис18П

РИС рис19П

Лавировка судна: плоскость паруса делит пополам угол между направлением килля и направлением ветра.

Сила, перпендикулярная киллю, уравнивается сопротивлением воды. Оставшаяся сила движет судно «по киллю».

В: Почему парус должен делить угол именно пополам?

О: Можно доказать, что при этом условии достигается максимум движущей силы.

В: *Вытягивание автомобиля.* Чтобы вытащить увязший автомобиль, можно поступить так. Привязать автомобиль длинной прочной веревкой к дереву вблизи дороги и сильно натянуть веревку. Потом тянуть под прямым углом к направлению веревки. Объясните физику этого способа.

РИС

Разложение сил -2

Перельман, Физика-2, с 30, рис 16

В: *Почему курица – наседка не боится сломать яичную скорлупу своим весом, а птенец легко пробивает ее изнутри?*

О: Прочность скорлупы снаружи объясняется исключительно ее выпуклой формой, так же, как и прочность каменных сводов и арок.

РИС

Клинообразная форма камней мешает им опускаться вниз, но не препятствует их поднятию.

Эксперимент: четыре сырых яйца выдерживают обычный стол.

3. Эксперимент ⇒ ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

И вот как по-ньютоновски звучал принцип инерции Галилея:

если все силы, действующие на тело, скомпенсированы, то его скорость не меняется:

$$\Sigma F = 0 \Rightarrow V = \text{const}$$

А вот так можно записать следующий шаг, сделанный Ньютоном:

$$\Sigma F \neq 0 \Rightarrow a \neq 0$$

т.е. **силы, действующие на тело, являются причиной его ускорения.**

Но это еще не закон движения. Это лишь логическая цепочка: наличие одной физической величины (силы) порождает другую (ускорение), т.е. они как-то связаны между собой. Как именно: прямо пропорционально? обратно пропорционально? корневым образом? квадратично?

РИС Соответствующие графики зависимостей $a(F)$

В: Некоторые из этих вариантов можно сразу отбросить, путем логических рассуждений. *Какие?*

Можно даже, рассуждая, выдвинуть предположение, гипотезу: сила и ускорение прямо пропорциональны друг другу. Но все равно - необходим эксперимент, только он может рассудить: правильно мы думаем или нет.

ПРАВИЛЬНО в физике - значит - ТАК, КАК в ОПЫТЕ !

В каком опыте? Как определить характер зависимости ускорения тела от величины, действующей на него силы? План такой:

РИС Тело-кубик, силы-стрелки и условный прибор-измеритель ускорения.

Возьмем какое-то конкретное тело. Подействуем на него с определенной силой F_1 и измерим полученное телом ускорение: a_1 . Потом на *то же самое* тело подействуем с другой определенной силой, например, $F_2 = 2F_1$. И измерим новое ускорение a_2 - посмотрим, во сколько раз оно больше или меньше a_1 . Для точности вывода проделаем несколько таких опытов с одним и тем же телом и с разными силами. В заключение построим график зависимости $a(F)$ и по его виду потараемся понять, что это такое (у меня есть надежда, что получится... Что?).

РИС

Соберем такую установку: на столе тележка, соединенная с динамометром и через нить и блок - с грузом, который мы будем менять. Подберем набор грузов так, чтобы они соответствовали значениям силы (показаниям динамометра), равным 0,1, 0,2, 0,3 (условных единиц силы). Проведем три опыта по описанному выше плану: цепляем груз №1, отпускаем тележку, измеряем ее ускорение

a_1 . Как? Легко сообразить, что достаточно знать (измерить) расстояние S до блока и в каждом опыте измерять (секундомером) время t движения тележки до блока. Тогда $S=at^2/2$ и ускорение $a= 2S/t^2$. Вот результаты нашего (компьютерного) эксперимента:

Таблица результатов эксперимента

F (y.e)	a (м/с ²)
0	0
0,1	0,2
0,2	0,4
0,3	0,6

А теперь мы представим наши результаты на графике, *это всегда полезно делать*:

РИС

Вот вам и прямо пропорциональная зависимость. Теперь мы, вслед за Ньютоном, с чистой совестью можем утверждать, что

ускорение тела прямо пропорционально силе, действующей на тело

$$a \sim F,$$

и направлено по направлению действия силы.

4. ИНЕРТНАЯ МАССА

Мы выяснили связь *изменения* характера движения тела (его ускорения) с *внешними* (по отношению к телу) причинами (силами со стороны других тел). Но есть и *собственные* свойства тела, способные повлиять на его же ускорение.

Вернемся ненадолго к нашему эксперименту с тележкой. Возьмем две одинаковые тележки и приложим к динамометру силу $F_2=0,2$.

РИС (Параллельное изображение двух опытов с одной и той же силой, приложенной к одной и к системе из двух тележек).

Измерим новое ускорение, получим $a_2'=0,2$ м/с². Это ровно вдвое меньше, чем раньше, когда мы брали в два раза меньше тележек.

Конечно, нет ничего неожиданного в том, что тяжелое, массивное тело труднее заставить изменить свою скорость, чем легкое. Получается, что *при одной и той же силе ускорение обратно пропорционально некоторой собственной характеристике тела.*

Она называется инертной массой тела.

Инертная масса тела m - количественная характеристика инертных свойств тела, т.е. его реакции на попытку изменить его скорость.

Разумеется, предыдущая фраза не есть определение массы. Вы понимаете, что необходим либо рецепт измерения, либо математическая формула связи массы с другими, независимо введенными величинами.

Честно говоря, здесь мы оказываемся, как витязь на распутье:

РИС (Физик на распутье: камень с тремя определениями массы)

существует, по меньшей мере, *три разных варианта определения массы*:

- с помощью еще не введенного нами третьего закона Ньютона (когда он у нас будет, тогда и поговорим);

- через процедуру взвешивания тела (практически самый популярный способ!) - об этом поговорим в ходе знакомства с законом всемирного тяготения;

- с помощью того самого закона, который мы так мучительно сейчас формулируем: $a \sim F$.

Делаем волевое усилие и выбираем последний вариант. По нескольким причинам. Одна из них очевидна - нетерпение: не хочется ждать (пока введем нужный закон) или забегать вперед с риском непонимания. Поэтому так:

Определение инертной массы тела.

Назовем инертной массой тела величину, обратную коэффициенту пропорциональности между ускорением тела и силой, вызывающей это ускорение:

$$a=(1/m)F$$

Здесь все корректно: поскольку у нас есть способ независимого определения как ускорения a , так и (одновременно!) независимого определения силы F , то коэффициент их пропорциональности автоматически получается из того же самого опыта.

Для разных тел этот коэффициент может быть разным, но во всех случаях он не зависит ни от силы, ни от ускорения тела. Масса - собственная характеристика данного тела. Она не зависит даже от внешних условий: температуры, влажности воздуха, давления...

Из этого определения видно, что одна и та же сила действительно должна придавать телам с разной массой разные ускорения (что нам хорошо известно из жизненного опыта и мультфильмов).

РИС Волк и заяц

В: А вот легкий мячик для пинг-понга получает меньшее ускорение при том же ударе ногой, чем футбольный мяч. (Почему?)

РИС

Заметим, что даже очень маленькая сила обязательно изменит скорость даже очень массивного тела, но только очень-очень мало изменит:

РИС Турист поднимается на лифте на Эйфелеву башню и бросает вниз спичечный коробок. Тот падает на землю, Земля получает некоторую добавку скорости.

Более инертному телу нужно больше времени, чтобы изменить свою скорость на нужную величину; его движение ближе к тому, которое мы называли движением по инерции (по закону инерции).

Масса - очень важная персональная характеристика тела. Она есть у любого тела и во многом определяет его поведение в нашем мире. У массы есть ряд интересных свойств, о которых стоило бы поговорить подробнее, но мы их просто перечислим (да и то не все).

В классической механике (есть еще квантовая!) масса аддитивна, т.е. сумма масс двух отдельных тел равна массе тела, получившегося в результате их объединения:

РИС $m_1 + m_2 = m$

Аддитивность - совсем не обязательное свойство любых величин. Например, сложение ваших оценок за четверть или полугодие дает оценку, совсем не равную их сумме.

РИС Школьный журнал с оценками...

Масса не зависит от скорости тела - стало быть, она не меняется при переходе в другую систему отсчета.

Обратите внимание: во многих не самых последних книгах вы можете прочитать по этому поводу (независимость массы от скорости) другое утверждение. Соответствующий разбор мы проведем в разговоре про специальную теорию относительности (релятивистская механика). Но, по крайней мере, в классической механике масса всегда - и раньше, и теперь - была независима от скорости тела.

Какие бы процессы ни происходили с участием данного набора тел, их суммарная масса остается неизменной (закон сохранения массы).

Масса - насколько нам известно, скалярная величина. Это означает, что инертные свойства любого тела одинаковы по всем направлениям.

Масса неотрицательна. Есть микрочастицы (фотоны), масса которых равна нулю. Но в классической механике они нам не встретятся. Масса остальных тел и частиц положительна. (Как увидеть это - положительность массы - из опыта по определению вида зависимости ускорения от силы?)

В заключение приведем значения масс некоторых «тел», от малых до больших.

РИС Ось, направленная вверх. Масса (сверху вниз) в граммах, степени числа 10:

- Вселенная = 57

- наша Галактика = 44
- Солнце = 33
- Земля = 27
- человек = 4
- грамм = 0
- электрон = -27
- нейтрино = -31

5. ВРЕМЯ СОБИРАТЬ КАМНИ (ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА)

Теперь главный закон можно записать в виде:

$$a = F/m ,$$

ускорение тела прямо пропорционально силе, действующей на тело и направлено по направлению действия силы.

Одновременно этот закон является определением инертной массы тела.

Если на тело одновременно действует несколько сил, то *опыт* говорит нам, что действие любой силы не зависит от наличия (или отсутствия) других сил (*принцип независимости действия сил*). Поэтому несколько сил сообщают телу ускорение, которое давала бы ему одна сила, равная их векторной сумме. В таком случае во втором законе Ньютона F - это *векторная* сумма всех сил, ее иногда называют *равнодействующей силой*.

 Все? Нет, не все. В наших размышлениях мы, вслед за Ньютоном, исходили из закона инерции. Но ведь он верен совсем не в любой ситуации, а лишь в инерциальных системах отсчета. Поэтому и наш главный закон механики - **второй закон Ньютона** будет звучать примерно так:

в и.с.о. ускорение тела (материальной точки) прямо пропорционально суммарной силе, действующей на тело, направлено по направлению действия силы, а коэффициентом пропорциональности между силой и ускорением является инертная масса тела.

Или короче:

2-ой закон Ньютона:

в и.с.о. $\Sigma F_i = ma$

Кое-что уточним.

Всегда ли верен второй закон? Только в и.с.о. - это мы уже говорили. Еще? Еще закон верен лишь для тел, движущихся со скоростями, много меньшими скорости света (примерно 300 000 км/с). Об этом, естественно, еще пойдет речь (в разговоре о релятивистской механике).

Повторим вопрос - всегда ли верен второй закон Ньютона - вот по какому поводу. Экспериментальный факт: ускорение ракеты возрастает даже в том случае, когда сумма приложенных к ней сил, постоянна. Как такое может быть? *Ответ:* при движении ракеты уменьшается ее масса. Наша формулировка второго закона предполагает неизменность массы тела.

Впрочем, позднее мы введем другой (*импульсный*) вид закона Ньютона, который позволит нам иметь дело даже с расчетом реактивного движения.

5. Остался еще один естественный вопрос: почему Ньютон назвал свой главный закон *вторым*? Значит, есть еще и *первый*? Есть!

Первым из своих *начал механики* сам Ньютон назвал *закон инерции Галилея*:

$$\text{если } \Sigma F = 0, \text{ то } V = \text{const.}$$

А основное - второе начало, второй закон - он сформулировал уже так:

$$\text{в таких с.о., в которых выполняется первый закон, справедливо: } \Sigma F = ma.$$

(Забегая вперед, заметим, что и третий (последний!) закон Ньютона тоже справедлив лишь в таких, инерциальных, системах отсчета).

Ясно, что первый закон потребовался Ньютону, чтобы *ввести* тот тип систем отсчета, в которых собственно и справедливы его второй и третий законы механики.

Поэтому сегодня физики обычно формулируют **первый закон Ньютона** так:

⇓

Существуют такие с.о., в которых материальная точка, не подверженная внешним воздействиям, движется с постоянной по величине и по направлению скоростью.

Такие с.о. называются инерциальными.

В такой форме **первый закон Ньютона** - это *постулат существования и.с.о.*

6. Почему второй закон Ньютона имеет такое значение для механики?

Главная задача механики - предсказать, как будет двигаться тело в конкретной ситуации. Иначе говоря, - выяснить зависимость $x(t)$ - координат тела от времени - и $v(t)$ - скорости тела от времени. Второй закон как раз и позволяет это сделать.

Например, для случая равноускоренного движения, как нам известно,

$$x(t) = x_0 + v_0 t + at^2/2 \quad \text{и} \\ v(t) = v_0 + at.$$

Видно, что для решения, кроме начальных условий (x_0, v_0) , необходимо знать ускорение тела. И второй закон Ньютона дает такую возможность: $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$, а по найденному ускорению уже можно найти скорость и координату (если, конечно, мы знаем, как именно меняется со временем сила, действующая на тело).

7. Внимательный ученик может сказать:

ну и чего мы (Ньютон!) достигли - вместо проблемы определения ускорения возникла новая проблема - определения сил. Их наверно много, и все разные - упругие, электрические, силы трения, тяготения, Архимеда... И наверно, у всех свои законы изменения - Гука, Кулона, того же Архимеда...

В чем же было достижение Ньютона?

В том, что, согласно второму закону, ускорение данного тела определяется только, *исключительно* внешними силами (есть ведь и другие физические величины). Это раз. И еще: *любая сила*, любого происхождения, может быть подставлена в закон Ньютона - и закон выдаст нам ускорение тела. Не нужно искать разных способов нахождения ускорения, скажем, для силы трения и для магнитной силы. Ньютон сказал: *закон един для всех сил!*

И наконец: второй закон утверждает, что сила в классической механике зависит от положения тела (его координат) и от его скорости - и только. Но не зависит, например, от скорости изменения ускорения и от других "производных по времени более высоких порядков".

Это так, потому что закон связывает силу с ускорением $\mathbf{a} = \Delta \mathbf{v} / \Delta t$, ускорение по определению зависит от скорости и времени, а скорость $\mathbf{v} = \Delta \mathbf{r} / \Delta t$ - от радиус-вектора тела (его координат) и времени. В результате получается, что $\mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$.

А с различными силовыми законами нам еще предстоит познакомиться.

8. Порешаем задачи

8.1 Парашютист

Парашютист массой $m=80\text{кг}$ опускается с раскрытым парашютом со скоростью 4 м/с . Чему равна сила сопротивления воздуха?

Решение: Т.к. скорость движения парашютиста постоянна (неважно какая), то его ускорение равно нулю. Действующие на него силы - это сила тяжести Земли $\mathbf{F}_{\text{тяж}} = m\mathbf{g}$ и сила сопротивления \mathbf{F}_c .

РИС

По второму закону $\mathbf{F}_{\text{тяж}} - \mathbf{F}_c = 0$. Поэтому $F_c = mg = 80 \times 10 = 800\text{Н}$.

8.2 Капля дождя, падая с большой высоты, испаряется. Как это влияет на ее движение?

Отв. При испарении уменьшается радиус капли. Разгоняющая каплю сила тяжести $F_{\text{тяж}} \sim R^3$. А замедляющая сила сопротивления воздуха пропорциональна величине поперечного сечения я капли, т.е. $F_c \sim R^2$. При испарении первая сила уменьшается быстрее второй. Поэтому движение испаряющейся капли замедляется.

РИС

8.3 Два тела с массами M и m подняты на одинаковую высоту над землей и одновременно отпущены. Средняя сила сопротивления тел одинакова. Одновременно ли они приземлятся?

8.4 Почему нагруженный автомобиль на булыжной мостовой движется более плавно, чем автомобиль без груза?

8.5 Ускорение ракеты возрастает даже в том случае, когда равнодействующая приложенных к ней сил равна нулю. Почему?

8.6 Тело движется по прямой под действием постоянной силы F . Как изменится график скорости этого движения в зависимости от времени, если сила начнет уменьшаться?

9. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

До тех пор, пока мы рассматриваем поведение только *одного* тела, нам вполне достаточно только *Второго* закона Ньютона. Но как только мы обратимся к системе хотя бы из двух тел - возникает вопрос:

РИС (Волк и Заяц - например, сцена армрестлинга)
как связаны между собой сила действия Волка на Зайца и сила действия Зайца на Волка?

Прежде всего, отметим, что в природе не бывает одностороннего действия - только взаимодействие.

РИС
Не может Волк дернуть Зайца за ухо без того, чтобы *одновременно* ухо не дернуло Волка за руку.

РИС Вы жмете на педали - одновременно - педали жмут на вас.

Однажды я услышал такую замечательную формулировку: **силы ходят только парами**. Причем, в этих парах соблюдается равноправие: **действие равно противодействию**.

РИС Величина силы, с которой *ружье действует на пулю*, равна величине силы, с которой пуля действует на ружье.

И наконец, такая замечательная формулировка (в одном американском учебнике):
невозможно дотронуться до кого-то так, чтобы при этом он не дотронулся до тебя!

Почему же при одинаковых силах действия и противодействия само *действие* (улет пули) так сильно отличается от *противодействия* (отдача ружья)? Потому что работает второй закон Ньютона: при одинаковых по величине силах эффект их действия, - изменение скорости тела, т.е. ускорение, тем *больше*, чем *меньше* масса тела. Сравните массы пули и ружья, Волка и Зайца - и вам все станет ясно.

И наконец, еще одна наблюдаемая закономерность: силы действия и противодействия *направлены противоположно*.

На эту тему есть старинная задача. Как осел может везти телегу, если векторная сумма сил, действующих на их содружество, на систему "осел + телега", равна нулю?

РИС
Внимательный ученик обязательно заметит, что мы не учли еще одну важную силу. Чтобы везти телегу, осел должен отталкиваться от поверхности земли, действовать на нее с какой-то силой. По третьему закону земля тоже будет действовать на осла - с такой же по величине силой. Поэтому суммарная сила, действующая на систему "осел + телега", вовсе не равна нулю!

А теперь пора сформулировать третий закон целиком и полностью:

третий закон Ньютона



В и.с.о силы взаимодействия двух тел равны по величине, противоположны по направлению и действуют вдоль прямой, соединяющей тела.

10. Обсуждение

Как обычно, *посмотрим пристально* на введенный *постулат* механики и отметим некоторые детали.

Первое: как и раньше, под телами имеются в виду материальные точки.

Второе: хотя и говорят - сила *действия*, сила *противодействия*, но они абсолютно равноправны, имеют одинаковую физическую природу, действуют одновременно, в течение одного и того же промежутка времени.

Третье. Почему силы взаимодействия двух материальных точек действуют вдоль прямой, проходящей через эти точки? Это следует из того, что две точки выделяют в пространстве единственное направление - ту самую прямую. Поэтому нет никаких физических причин для того, чтобы этим силам быть направленным как-то иначе.

(В физике очень часто используются соображения симметрии! И мы тоже часто будем ими пользоваться.)

Четвертое. Последний из основных законов механики можно использовать для выбора способа измерения массы любого тела. В самом деле, запишем третий закон для взаимодействия тел с массами m_1 и m_2 : $m_1 a_1 = m_2 a_2$ - здесь a_1 и a_2 - ускорения, полученные телами в результате взаимодействия. Если одно из тел выбрать в качестве эталона массы, т.е. принять его массу (по договоренности!), например, за 1 кг, то массу второго тела можно найти, измерив отношение ускорений этих двух тел - эталона и с неизвестной массой:

$$m_2 a_2 = m_1 a_1 \rightarrow m_x = (a_2/a_1) m_1$$

11. Кстати, **о единицах измерения** интересующих нас величин. В международной системе единиц (SI) масса является основной единицей, т.е. такой, которая кладется в основу построения данной системы единиц. (Другие основные единицы в SI - это единица длины - метр, единица времени - секунда, единица силы тока - ампер и еще одна единица - из оптики, - кандела (или свеча)). Для всякой основной единицы обязательно (по общему соглашению) выбирается эталон. Есть такой эталон и для массы - его зовут 1 кг.

РИС (эталон массы)

Ускорение, конечно, не основная, а производная (от основных!) физическая величина. Ее размерность m/c^2 выражается через размерности длины и квадрата времени. Что же касается силы, то она - тоже производная величина. По определению **1 ньютон = $1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м}/\text{с}^2$** . (1 ньютон - такая сила, которая телу с массой 1 кг сообщает ускорение $1 \text{ м}/\text{с}^2$). Обозначение единицы силы в SI такое: 1Н.

Обратите внимание, что единицы, названные в честь какого-то человека пишутся с заглавной буквы. Хотя, если вдуматься, это звучит довольно странно 2 Ньютона, 3 Ньютона ... - как такое возможно? ...Ну, это еще ничего! А 0,5 Ньютона?!

РИС Много разных Ньютонов: толстый, как 3Н, инвалид (0,5 Н), сиамские близнецы (2Н).

12. В заключение выпишем **ВСЕ ЗАКОНЫ НЬЮТОНА** и полюбуемся еще раз результатом его (и немножко нашей) работы:

1-ый закон Ньютона:

существуют такие с.о., в которых материальная точка, не подверженная внешним воздействиям, движется с постоянной по величине и по направлению скоростью.

Такие с.о. называются инерциальными.

Существуют с.о. (и.с.о.) такие, что: $\Sigma \mathbf{F} = 0 \Rightarrow \mathbf{v} = \text{const}$
--

(Есть мнение, что закон в рамочке запоминается легче, хотя выполняется точно так же строго.)

2-ой закон Ньютона:

в и.с.о. ускорение тела прямо пропорционально суммарной силе, действующей на тело, и направлено по направлению действия силы, а коэффициент пропорциональности является мерой инертности тела:

В И.С.О. $a = F /$

3-ий закон Ньютона:

В и.с.о. силы взаимодействия двух частиц равны по величине, противоположны по направлению и действуют вдоль прямой, соединяющей частицы:

В И.С.О. $F_{12} = - F_{21}$

Сила - количественная характеристика взаимодействия тел, измеряемая по величине деформации, вызываемой ею.

Сила - вектор, это экспериментальный факт.

Сила, с которой одна частица действует на другую, в классической механике может зависеть только от радиусов - векторов и скоростей этих частиц.

Присутствие других сил (от других частиц) на данную силу никак не влияет -

это принцип независимости действия сил.

Инертная масса тела - скалярная величина, обратная коэффициенту пропорциональности между ускорением тела и силой, вызывающей это ускорение; количественная характеристика инертных свойств тела, т.е. его реакции на попытку изменить скорость тела.

РИС Стилизация пушкинского рисунка с подписью:
Ай, да Ньютон, ай, да сукин сын!

13. Стандартные задачи

13.1 На нити подвешен груз массой 1кг. Нить с грузом опускают (поднимают) с ускорением $5m/c^2$. Определите силу натяжения нити.

13.2 Два груза с массами M_1 и M_2 , лежащие на плоскости, связаны легкой нитью. На одно из тел действует сила F под углом α к горизонту. Найдите ускорения тел.

РИС

13.3 Те же два груза соединены нитью, перекинутой через невесомый блок. Все находится в поле силы тяжести. Найдите ускорения тел.

РИС

13.4 То же, но нить перекинута через невесомый блок, установленный на вершине наклонной плоскости. Угол наклона плоскости α . Трения нет. Найдите ускорения тел.

РИС

13.5 Шар массой M подвешен на невесомой и нерастяжимой нити длиной H и совершает колебания в вертикальной плоскости. Найдите силу натяжения нити в тот момент, когда скорость шара равна V , а угол нити с вертикалью α .

13.6 (Г2.7) Найдите ускорения грузов, подвешенных на неподвижном и подвижном блоках и силу натяжения нити.

Рис

14. Как проверить ответ (Г. Меледин, Квант, 7/79)

Всегда хочется убедиться в правильности своего решения задачи. Существует много способов быстро обнаружить ошибку: заглянуть в ответ, позвонить однокласснику, решить задачу другим методом. Но такие возможности есть не всегда. Рассмотрим несколько приемов, которыми часто пользуются физики.

14.1 Проверка по размерности.

В качестве примера возьмем известную задачу:

Через неподвижный блок перекинута незакрепленная нить с грузами массой m_1 и m_2 на концах. Найдите силу натяжения нити T при движении грузов.

РИС

Ответ: $T = 2m_1m_2g / (m_1 + m_2)$

Проверим размерность ответа. Произведение масс, деленное на их сумму, имеет размерность массы, а умноженное на ускорение g – дает размерность силы, как и должно быть: размерности обеих частей ответа совпадают.

14.2 Проверка на предельных случаях

Идея: Взять простейшие значения параметров задачи, такие, при которых ответ и так очевиден, и посмотреть, даст ли общая формула такой же результат.

Вернемся к задаче с блоком и двумя телами.

Если любая из масс (одна!) равна нулю, то оставшееся тело свободно падает, и натяжения нити нет: $T=0$. Это же следует из полученной нами формулы.

Другой вариант: при отсутствии гравитации ($g=0!$) сила натяжения тоже исчезает. В нашей формуле – ответе при $g=0$ получается то же самое.

Наконец, рассмотрим случай равных масс: $m_1 = m_2 = m$. При этом грузы будут покоиться или двигаться равномерно. Ясно, что при этом сила натяжения нити T будет равна весу любого из грузов. Наша формула дает тот же результат.

Заметим, что часто такую проверку устраивают именно на предельных случаях: при самых малых и самых больших (бесконечно больших) значениях параметра.

14.3 Проверка по симметрии

Если в условии нашей задачи мы поменяем местами тела 1 и 2, то ответ – величина силы T – не изменится (изменится направление движения грузов). Поэтому ответ не должен меняться при перестановке индексов 1 и 2.

Действительно: $2m_1m_2g / (m_1 + m_2) = 2m_2m_1g / (m_2 + m_1)$.

15. Динамика вращательного движения материальной точки -

никаких особенностей не имеет. Как обычно, центральное соотношение - это второй закон Ньютона для движущегося (по окружности) тела. Следует, конечно, помнить, что при вращательном движении векторное равенство, выражающее этот закон

$$\sum F_i = ma,$$

почти всегда следует спроектировать на радиальное (нормальное) и на касательное (тангенциальное) направления:

$$\sum F_n = ma_n \quad (*)$$

$$\sum F_\tau = ma_\tau \quad (**)$$

При этом $a_n = v^2/R$ - здесь v - скорость тела в данный момент времени, а R - радиус вращения.

Нормальное ускорение отвечает за изменение скорости только по направлению.

Иногда $a_n = v^2/R$ называют *центростремительным ускорением*. Происхождение такого названия понятно: это ускорение всегда направлено к центру вращения.

РИС

Эта невинная терминология порождает массовое заблуждение. Почему-то считают, что существует некая особая центростремительная сила:

$$F = mv^2/R$$

Т.е. есть сила тяжести, сила трения, сила нормальной реакции опоры и т.д., а **еще** есть центростремительная сила. Разумеется, это чушь.

Нет никакой особой центростремительной силы!

mv^2/R - это просто то, чему равна алгебраическая сумма проекций всех сил на радиальное направление при вращательном (и вообще - при криволинейном) движении (см. (*)).

РИС

Рекомендация - не пользоваться такими обозначениями, как центростремительная сила и центростремительное ускорение.

Порешаем стандартные задачи:

15.1 (Г2.30) Конический маятник

РИС

Шарик, подвешены на нити длиной L , равномерно движется по окружности в горизонтальной плоскости. При этом нить образует угол φ с вертикалью. Найдите период вращения маятника.

15.2 Небольшой шарик массой m подвешен на нити.

Нить с шариком отклонили горизонтально и отпустили. Найдите силу натяжения нити в тот момент, когда нить составляла угол 30° с горизонтом.

РИС

Отв. $F=(3/2)mg$.

15.3 (ПК №2/99 с. 21)

Вокруг вертикально расположенного стержня вращается насаженный на него диск. На диске находится шарик, прикрепленный к стержню нитью длиной L и составляющей угол α со стержнем. С каким периодом T должна вращаться система, чтобы шарик не отрывался от диска?

РИС

Отв: $T \geq 2\pi\sqrt{L(\cos \alpha)/g}$

16. Порешаем разные задачи

16.1 (2.1.4)

РИС

Четырём на натянутыми нитями груз закреплен на тележке.

16.2 (2.1.5)

Какая сила действует в поперечном сечении однородного стержня

РИС

Решение.

16.3 (2.1.6)

РИС

Два тела массы m_1 и m_2

16.4 (2.1.12) Маляр

РИС

Маляр работает в подвесной люльке.

Решение.

16.5 (2.1.13)

Система из трех одинаковых шаров

РИС

Решение.

16.6 (2.1.32)

РИС

Определите силу, действующую на вертикальную стенку

Решение.

16.7 (2.1.14)

РИС

Тела массы m_1 и m_2 соединены пружиной жесткости k .

16.8 (2.1.25)

РИС

Нить, перекинута через блок с неподвижной осью

Решение.

16.9 (2.1.48)

РИС

Между двумя одинаковыми гладкими брусками

16.10

Тело массой 2 кг лежит на гладком горизонтальном столе. К телу прикрепляют нить и перекидывают ее через блок, укрепленный на краю стола. В каком случае тело будет двигаться с большим ускорением:

- а) если за конец вертикальной нити потянуть с силой $F=9,8$ Н?
- б) если на конец вертикальной нити подвесить тело массой 1 кг?

РИС

17. Проверочная работа «Что такое» :

Что такое:

- и.с.о.?
- способ определения инерциальности данной системы отсчета?
- инертная масса тела?
- 1 кг?
- условия справедливости 2-го закона Ньютона?
- сила?
- то, из чего следует 3-ий закон Ньютона?
- то, из-за чего так важен 2-ой закон Ньютона?

ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ГАЛИЛЕЯ

1. Вглядываясь во *второй закон Ньютона*, мы можем докопаться (чисто логически!) до одной идеи, которую впервые озвучил еще Галилей, но значение которой физики (и благодарное человечество) оценили лишь спустя 250 лет, во времена Максвелла, Пуанкаре и Эйнштейна.

Итак:

в и.с.о. $a=F/m$

Обратите внимание: в законе не говорится, в какой именно и.с.о. справедливо равенство $F=ma$. Это значит, что связь между силой и ускорением имеет один и тот же вид в любой и.с.о. Задумаемся: основной закон классической механики не должен менять своего вида при изменении системы отсчета, лишь бы она оставалась инерциальной. Иначе говоря, соотношение между величинами остается тем же самым для любых двух наблюдателей, которые движутся относительно друг друга с постоянной по величине и направлению скоростью:

РИС

Строго говоря, это означает, что второй наблюдатель может (в результате измерений) получить другое значение силы (F'), другое значение массы (m') и другое значение ускорения (a'). Но вот вид самого закона должен остаться прежним: $F'=m'a'$. Возникает довольно *естественная мысль*: если основной закон механики не меняется в зависимости от выбранной и.с.о., то вполне вероятно, что и *остальные* законы механики тоже обладают таким замечательным свойством - их вид не зависит от выбора и.с.о.

Такую мысль впервые высказал сам Галилей. Как обычно, свою гипотезу он предварил рядом мысленных экспериментов. В одном из них вода капала вниз, попадая в узкое горлышко бутылки. Галилей говорил: если поставить такой опыт не у себя в комнате, а в каюте равномерно движущегося корабля, то результат будет один и тот же:

РИС

капли воды не отстают от движущейся (относительно берега) каюты. Причину Галилей видел в том, что

все инерциальные системы отсчета равноправны с точки зрения механики.
Современная формулировка этого положения звучит так:

все законы механики одинаковы во всех и.с.о. (ПОГ)

ПОГ - *Принцип Относительности Галилея.*

Это действительно *физический принцип*, т.е. положение, основанное на результатах многочисленных экспериментов.

Запомним этот результат, потому что нам он пригодится задолго до того, как мы займемся теорией относительности Эйнштейна.

2. РОЛЬ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ - ВИД ДВИЖЕНИЯ В РАЗНЫХ С.О.

Одно замечание. Вспомним, что масса тела не меняется при переходе к другой системе отсчета: $m=m'$. А сила? А значение силы для любого наблюдателя - это та риска динамометра, против которой находится конец пружины:

РИС

Может ли измениться число против этой риски от того, что я буду идти мимо этой пружины, а не стоять рядом? Вряд ли! А тогда - по второму закону Ньютона - и ускорение будет обладать тем же свойством: $\mathbf{a}=\mathbf{a}'$ - неизменностью при переходе к другой и.с.о. Кстати, вывод про ускорение тела можно было сделать, не прибегая ко второму закону, а пользуясь только определением ускорения (*попробуйте сделать это самостоятельно!*).

Итак, второй закон был, похоже, обречен на постоянство: все входящие в него величины, по отдельности, оказались неизменяемыми при переходе к другой и.с.о. Но принцип относительности Галилея (ПОГ) ничего не говорит про неизменность *отдельных величин*. Он утверждает лишь неизменность *вида зависимости* между величинами в любом законе механики. Что касается второго закона Ньютона, то он удовлетворяет ПОГ *с запасом*.

3. ДОПОЛНЕНИЕ А: О смысле ПОГ

Классическая механика предполагает, что пространство однородно и изотропно (это означает отсутствие выделенных точек и направлений), а время однородно (нет выделенных моментов времени) и однонаправленно.

Тела как бы *погружены* в пространство. Течение времени а) никак не связано с пространством и б) не зависит от наличия в пространстве тел (частиц) и от вида их движения. Все это справедливо лишь *в рамках классической механики*.

В связи с этим **уточним**, что

ПОГ содержит в себе по существу следующие четыре утверждения:

- 1) Законы механики не меняются *при координатном сдвиге* системы отсчета, т.е. при преобразованиях координат вида

$$x'=x+a, y'=y+b, z'=z+c, t'=t.$$

РИС На рисунке изображен случай, когда $b=c=0$.

Это утверждение является следствием *однородности пространства*.

- 2) Законы механики не меняются *при повороте с.о.* относительно любой из осей координат, например, при повороте вокруг оси z на угол α :

$$x' = x \cos \alpha + y \sin \alpha, \quad y' = -x \sin \alpha + y \cos \alpha, \quad z' = z, \quad t' = t.$$

РИС

(Следствие *изотропности пространства*.)

- 3) Законы механики не меняются при сдвиге по времени, т.е. при преобразованиях вида:

$$x' = x, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t + a.$$

(Следствие *однородности времени*.)

- 4) Законы механики не меняются при преобразованиях, соответствующих *равномерному поступательному движению с.о.*, т.е. при преобразованиях вида:

$$x' = x - v_x t, \quad y' = y - v_y t, \quad z' = z - v_z t, \quad t' = t. \quad (\text{ПГ})$$

РИС

на рисунке случай $v_y = v_z = 0$

Такие преобразования называются **преобразованиями Галилея**.

Мы еще встретимся с ними в рамках этого курса.

4. ДОПОЛНЕНИЕ В: О смысле инвариантности законов

("Инвариантность" - неизменность.)

Когда говорят, что "законы механики не меняются при некоторых преобразованиях системы отсчета" (или - "законы механики *инвариантны* относительно таких-то преобразований"), то имеют в виду, что уравнения, выражающие эти законы, удовлетворяют двум условиям:

- а) После выполнения преобразований, связанных с переходом к новой системе отсчета, структура равенств в новых переменных имеет точно такой же вид, какой она имела в старых.

$$(\mathbf{F} = m\mathbf{a} \Rightarrow \mathbf{F}' = m'\mathbf{a}')$$

- б) Все функции новых переменных (от координат, скоростей и ускорений) имеют точно такой же вид, какой они имели в старых переменных.

(Проверьте, что $F(r_1 - r_2) \Rightarrow F'(r'_1 - r'_2)$ для любого из четырех типов преобразований с.о., перечисленных выше - и условие б) выполняется; а $F(r) \Rightarrow F(r-a)$ при сдвиге системы отсчета вида $t' = t + a$, $t' = t$ - в этом случае условие б) не выполнено.)

При выполнении условия а), но невыполнении условия б) - см. последний пример, говорят о *ковариантности* уравнений (законов) относительно данного преобразования.

("Ковариантный" - совместно изменяющийся.)

Повторим, что ПОГ подразумевает именно *инвариантность* законов механики при переходе от одной и.с.о. к любой другой.

Задачи и вопросы

2. Какую силу нужно приложить, чтобы натянуть веревку строго горизонтально, совсем без провиса?

Бесконечно большую. Нулевую. Зависит от материала веревки.

3. Иногда при буксировке корабля другим судном на трос вешают якорь. Зачем?

Чтобы не лопнул трос. Чтобы видеть направление троса в тумане. По религиозным соображениям.

4. Кто впервые установил, что силы складываются чтобы видеть направление троса.

хвост кита; пылесос; лампочка 100 Вт; человек (в среднем);

6. Что такое ПЯДЬ?

древнерусское число (пять); **древнерусская единица длины;** единица площади земли русской

7. При распределении копий первого эталона килограмма массы между странами в 1889 году в Париже России достались копии №:

1 и 2; 99 и 100; **12 и 26;** ничего не досталось (не хватило)

8. Из российских эталонов-копий до нашего времени сохранились копии №

1; 2; 99; **12; 26;** ничего не осталось

9. Само название КИНЕМАТИКА предложил

Архимед; **Ампер;** Антей; Амбрэ

10. Верно ли народное утверждение: "Лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать"?
Да; Нет; **Зависит от ситуации**