

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ДИНАМИКИ НЬЮТОНА

Основные законы

I. Законы Ньютона

1. Существует хотя бы одна инерциальная система отсчета.

2. Сумма всех сил, приложенных к любой материальной точке со стороны других тел, равна произведению массы точки на ее ускорение в инерциальной системе отсчета:

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

3. Две материальные точки действуют друг на друга с силами, которые:

- а) Противоположны
- б) Одной природы
- в) Не зависят от системы отсчета
- г) Принадлежат прямой, соединяющей эти точки.

II. Свойства массы

- а) Масса – положительное число
- б) Масса тела не зависят от системы отсчета
- в) Масса тела равна сумме масс его частей.

Три закона Ньютона и свойства массы являются *фундаментальными законами* динамики Ньютона. Их также можно назвать *постулатами* или *аксиомами* классической динамики, мы будем использовать выделенные термины как синонимы (вспомните пятый постулат Евклида, он же — аксиома параллельности) Первый закон Ньютона (в современной формулировке) постулирует существование систем отсчета, в которых выполняется основное соотношение второго закона Ньютона (*основное уравнение динамики материальной точки*). Третий закон Ньютона позволяет нам, зная силу действия первого тела на второе определить силу действия второго тела на первое (силу противодействия) конкретно, указать ее модуль, направление и точку приложения.

Здесь уместно задать вопрос: а почему во втором законе Ньютона масса множится именно на ускорение? Во многих школьных курсах вместо вопроса здесь формулируется утверждение, которое звучит так: **сила – причина ускорения**. Так вот, почему сила – причина ускорения? С одной стороны, казалось бы, вопрос лишен смысла. Действительно, что мешает нам помножить ускорение тела на некоторое положительное число, названное массой, и, в свою очередь, назвать полученное произведение силой? Не мешает ничего. Но, если речь идет только о формальном действии, по сути, векторной алгебры, то, с тем же успехом, можно было бы взять вместо ускорения тела его скорость или еще что-нибудь. Со скоростью было бы даже проще, а с позиций бытового восприятия еще и наглядней. Действительно, как нам хорошо известно, для того чтоб двигать по квартире шкаф, нужно постоянно прикладывать к нему силу; как только мы прекратим это делать, шкаф тут же остановится. Так не лучше ли было бы записать основное уравнение динамики в виде

$$\sum \vec{F} = m\vec{v}?$$

Такая формула куда более наглядно отражает смысл того понятия, которое мы в быту привыкли называть словом «сила»! Последняя формула количественно отражает идеологию механики Аристотеля (о ней стоит поговорить отдельно) если бы ее постулаты содержали основное уравнение динамики, то оно было бы именно таким. Однако количественных соотношений в механике Аристотеля так и не было сформулировано, опять же, почему?

Ответ на этот и ранее поставленные вопросы в общих чертах таков. Мало выбрать какую-либо кинематическую величину, как-то преобразовать ее и полученное выражение назвать словом «сила». Этот шаг стоит делать лишь тогда, когда мы уверены, что сможем определить свойства окружающих нас тел, от которых зависят векторы введенных нами сил. Причем сделать это необходимо независимо от выбранной нами кинематической величины (в случае динамики Ньютона — таковой является ускорение тела, движение которого мы описываем)! И оказывается, мир устроен так, что если рассматривать в качестве причины ускорения силу, то в огромном множестве практически важных случаев отыскать такие свойства у тел удастся, а если считать силу причиной движения, подобных свойств у физических тел не наблюдается. Вдумаемся в значимость этого факта. В действительности науке несказанно повезло. Ведь, в принципе, мир мог бы быть устроен и так, что у физических тел не существовало бы свойств, определяющих хоть какую-то кинематическую величину, будь то радиус-вектор, скорость, ускорение или даже скорость изменения ускорения — рывок. Только потому, что такие свойства все-таки удалось найти, оказалось возможным решение основной задачи механики: зная ускорение тела, а также его начальное положение и скорость, мы можем проделать обратный путь от ускорения к радиус-вектору и написать закон движения тела, как это делается в некоторых случаях, было разобрано нами в кинематике.

Но повезло не только науке, в каком-то смысле, изрядно повезло и нам самим. В свое время автор этого курса руководил проектной работой учащегося лица 1511 при НИЯУ МИФИ Елишева Андрея, посвященной антропному принципу. Среди прочих там рассматривался вопрос: а могла бы существовать планетарная система, типа Солнечной, в которой сила всемирного тяготения определяет не ускорение планеты, а ее скорость или рывок. Что произошло бы в первом случае, предугадать нетрудно — планеты просто попадали бы на Солнце. Случай с рывком гораздо менее очевиден. Мы решали задачу численно, варьируя самым различным образом начальные условия. Но результат всегда был один: планета делала единственный вираж вокруг звезды и уносилась в безбрежные просторы «рывковой Вселенной». Таким образом, тот факт, что в нашем мире свойства и относительное расположение тел определяют именно их ускорения, чрезвычайно благоприятен для образования устойчивых планетарных систем во Вселенной, без которых вряд ли можно было бы говорить о зарождении хоть какой-либо, а значит, и разумной жизни — отсюда и название «антропный принцип».

Коль скоро значимость того факта, что мир устроен по принципу законов Ньютона оценена по достоинству, следует осознать так же и то, что самих законов Ньютона для решения основной задачи механики недостаточно. Действительно, раз мы говорим о свойствах тел, определяющих силы, то нужно указать эти свойства. Другими словами, аксиоматика механики Ньютона пока неполна, нам необходимы

III. Законы конкретных сил

Их очень много. В качестве примера приведем три силы, часто используемые в школьном курсе механики.

Сила тяжести:

$$\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g}$$

где m — масса тела, \vec{g} — ускорение свободного падения.

Сила упругости (закон Гука):

$$\vec{F}_{\text{упр}} = k\vec{x}$$

где k — жесткость пружины, \vec{x} — деформация, то есть вектор, проведенный из недеформированного положения в данное.

Сила трения тела о поверхность:

$$\vec{F}_{\text{тр}} = \begin{cases} -\vec{F}_{\text{сдв}}, & \text{если } v_{\text{отн}} = 0, \\ -\mu N \frac{\vec{v}_{\text{отн}}}{v_{\text{отн}}}, & \text{если } v_{\text{отн}} \neq 0; \end{cases}$$

где $\vec{F}_{\text{сдв}}$ — сила сдвигающая тело (направлена вдоль поверхности), N — сила нормальной реакции опоры, μ — коэффициент трения, $\vec{v}_{\text{отн}}$ — скорость тела относительно поверхности.

Список законов конкретных сил всегда может быть неограниченно дополнен (приведите примеры). Таким образом, система аксиом механики, даже будучи дополненной законами конкретных сил, все равно неполна.

Так что же такое масса и сила?

Одно из определений силы мы только что рассмотрели. Можно привести и более вычурное определение, встречающееся в школьных курсах

Сила – это количественная мера взаимодействия тел, служащая причиной их ускорения или деформации.

Такого рода определения, хотя и говорят о количестве, тем не менее, являются качественными. Они могут дать какое-то представление о том, с чем мы будем иметь дело в динамике, а также позволяют ответить на некоторые вопросы, возникающие в процессе решения конкретных задач. Тем не менее, мой опыт преподавания физики показывает, что ученик, как правило, просто заучивает их, не усматривая связи с конкретными задачами динамики. И это не удивительно, поскольку ее там и в самом деле почти нет. Действительно, главное, чем мы пользуемся в конкретных задачах – это второй закон Ньютона и формулы конкретных сил, но ни то, ни другое никак не звучит в качественных определениях. Поэтому ученик, пытающийся понять смысл величины, называемой в механике словом «сила», может легко прийти к заключению о том, что в физике иногда делаются утверждения, не имеющие особого практического смысла, и будет не столь уж и не прав.

Традиционные качественные определения силы имеют также и следующий недостаток. Пытаясь дать определение силы, мы неизбежно прибегаем к иным понятиям, через которые смысл слова «сила» пытаемся истолковать. Продолжать так можно до бесконечности, но ясно, что где-то надо остановиться. А если мы рассматриваем, основные законы механики Ньютона в качестве аксиом классической механики, то это и есть тот пункт, где сделана остановка. Но тогда у силы и вообще определения быть не может: сила и масса, подобно точке и прямой в геометрии, являются основными или так называемыми неопределяемыми понятиями механики. В таком случае и вообще не стоит пытаться формулировать определения понятий массы и силы.

Если понимать понятие определения в упомянутом выше смысле, то это действительно так. Но кто заставляет нас так понимать его? Что нам нужно от определения чего-либо?

Исчерпывающая и точная информация о том, что это такое. Но ведь именно эту задачу решают аксиомы для «неопределяемых» понятий! Вот мы и пришли к решению проблемы: нам не нужно отдельно формулировать определения массы и силы, поскольку вся информация о них содержится в основных законах динамики.

Все законы Ньютона, а также законы конкретных сил, короче говоря, все аксиомы классической динамики неявным образом определяют понятия массы и силы. Эти определения все же неполны, поскольку список законов конкретных сил всегда может быть дополнен, в том числе, с использованием массы.

Аксиоматические определения можно сформулировать также и явно. Тогда они будут звучать следующим образом.

Сила – вектор, определяемый системой законов Ньютона и основных видов сил.

Масса – положительное число, определяемое вторым законом Ньютона, законом гравитации, а также обладающее свойством аддитивности и удовлетворяющее закону сохранения.

Инерциальная система отсчета

По сути, понятие инерциальной системы отсчета (ИСО) также ведено в механику аксиоматически, стало быть, формулировать его отдельно нет необходимости. Действительно при решении конкретных задач нам нужно знать, что:

- 1) в некоторой системе отсчета выполняется основное уравнение динамики
- 2) хотя бы одна такая система отсчета существует.

Систему отсчета, удовлетворяющую перечисленным условиям, мы и называем инерциальной. Таким образом,

Название и определение инерциальной системы отсчета содержится в первом и втором законах Ньютона.

Однако, следуя традиции, все же сформулируем определение ИСО, обычно оно включается в формулировку первого закона Ньютона: *система отсчета, в которой материальная точка сохраняет свою скорость, если сумма всех сил, приложенных к ней со стороны других тел равна нулю, называется инерциальной.* В связи с этим определением, мне хотелось бы сформулировать один парадокс. Рассмотрим материальную точку, про которую точно известно, что сумма всех действующих на нее со стороны других тел сил, равна нулю. Всегда найдется система отсчета, в которой она сохраняет свою скорость – это СО, связанная с самой материальной точкой. Следовательно, инерциальная система отсчета существует. Прodelав эти рассуждения, мы похоже, доказали... первый закон Ньютона! Однако первый закон – это аксиома, как тогда он может быть доказан? Прежде чем двигаться дальше, уважаемый читатель, предлагаю немного подумать над только что сказанным.

В качестве примера того, о чем действительно говорит нам первый закон Ньютона, рассмотрим гипотетическую ситуацию, которую я каждый год в красках обрисовываю, на дополнительных занятиях и семинарах по механике. Наша планета, Земля. Вокруг нее в космосе движется множество разнообразных тел: метеориты, спутники, да и просто космический мусор. Всем этим телам, независимо от их скорости, сила гравитации Земли сообщает ускорение, направленное к центру планеты. А теперь собственно представим, что все упомянутые выше тела продолжают двигаться с прежними ускорениями, а Земля... исчезла! Но мы, с невозмутимым спокойствием продолжаем заниматься механикой! Можно ли теперь наличие ускорений наблюдаемых нами тел объяснить действием силы? Очевидно, нет. Ведь нет тела, со стороны которого эта сила бы действовала. В то же время мы могли бы связать систему отсчета с любым из рассматриваемых тел и, в ней оно будет сохранять свою скорость. Однако не существует такой системы отсчета, в которой ускорения всех тел были бы равными нулю. (Последнее утверждение также очевидно, но можно и строго доказать его, сделайте это самостоятельно) А первый закон Ньютона утверждает, что система отсчета, в которой ускорения всех тел при отсутствии сил обратятся в ноль должна существовать. Следовательно, согласно первому закону Ньютона, ситуации, описанной в нашем мысленном эксперименте, в действительности не бывает, и это хорошо!

Наш мысленный эксперимент был проделан, очевидно, не зря. В результате его мы убедились, что в определении инерциальной системы отсчета перед фразой «материальная точка» подразумевается прилагательное «любая» Оставим филологам вопрос, должно ли оно там обязательно быть или, в подобных ситуациях его всегда надо подразумевать. Вместо этого просто напишем слово, смысл определения от этого не пострадает, а сама формулировка станет точнее:

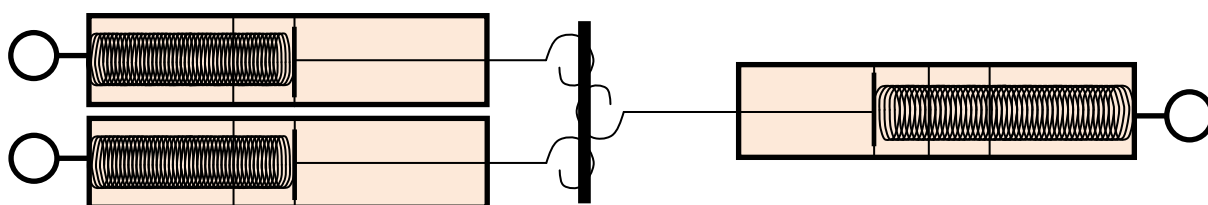
Система отсчета, в которой любая материальная сохраняет свою скорость, если сумма всех сил, приложенных к ней со стороны других тел равна нулю, называется инерциальной.

Опытная проверка основных положений динамики

Коль скоро законы Ньютона и формулы конкретных сил, в рамках механики Ньютона являются аксиомами и, следовательно, не доказываются, то, как их проверить? На этот вопрос существует известный, очевидный и, в общем-то, верный ответ: опытным путем. Собственно так эти законы и были установлены. Ситуация здесь, однако, далеко не столь проста, как кажется на первый взгляд. Возьмем, к примеру, второй закон Ньютона. Чтобы действительно его проверить, необходимо измерить ускорение, массу и силу, независимо друг от друга и от самого второго закона Ньютона. Для измерения силы можно пожертвовать каким-либо из законов конкретных сил (к примеру, все тем же законом Гука) То есть мы можем изготовить пружинный динамометр и, в соответствии с законом Гука равномерно проградуировать его шкалу. Тогда для измерения силы во всем мире придется пользоваться только этим динамометром – это крайне неудобно, но, в принципе, осуществимо. Однако законом Гука, при этом, мы действительно пожертвовали, теперь он перестает быть фундаментальным законом механики и становится просто определением силы. Кроме того, мы выбрали закон Гука, конечно потому, что уже знаем о

пропорциональности силы упругости пружины ее деформации. А при больших деформациях это уже не так, и здесь возможны проблемы...

Можно, что часто делают, предложить эталонный способ измерения силы. Суть его в следующем. Возьмем какую-либо пружинку с крючком на конце, растянем ее на определенную длину и полученную таким образом силу упругости примем за единицу силы, назовем ее условно 1 Гук. Далее сцепим крючками две пружинки и растянем их в разные стороны. Вторая пружинка, очевидно, тоже даст силу в 1 Гук. Таким способом мы можем изготовить нужное нам число эталонов силы в Гуках. После этого можно приступить к изготовлению динамометра. В качестве пружины динамометра можно выбрать одну из эталонных пружинки, в этом случае у нас уже есть деление в 1 Гук. Далее соединим параллельно две эталонных пружинки и растянем с их помощью динамометр. Напротив положения подвижного конца его пружины сделаем отметку «2 Гук» (см рис.). Затем возьмем три эталонных пружинки и т.д. В итоге получим динамометр, который для своего изготовления, не потребовал применения закона Гука – выбор единицы силы оказался



Градировка пружинного динамометра

неудачным, но название уже ввели — так иногда случается в физике.

Ясно, однако, что эталонный способ задействует, как минимум, третий закон Ньютона (и тогда уже его мы не сможем проверить экспериментально) а также предполагает способ сложения сил, называемый в механике принципом независимости действия сил и включенный нами во второй закон Ньютона. Остается также ряд других вопросов, например, учет масс динамометров (а измерения проводим на земле!) и определение дольных делений (относительно них надо делать либо допущение, основанное снова на законе Гука, либо для дольных единиц динамометр окажется неприменим).

Ничуть не лучше ситуация с измерением массы. Для примера приведем два наиболее часто приводимых способа ее измерения.

1. Взвешивание. Используется первый и второй законы Ньютона, а также закон силы тяжести.

2. Сравнение ускорений тел неизвестной и эталонной массы, при их взаимодействии друг с другом. Подробно этот способ рассмотрен в учебнике Кикоиных. Используются все законы Ньютона.

Ситуация кажется безрадостной и безвыходной. Понять ее причины, однако, нетрудно. Мы попытались проверить основания теории, не выходя за пределы самой теории. Но в этом случае у нас и нет ничего, кроме ее аксиом: физические процессы, происходящие в любых системах, будут проявлением либо самих аксиом, либо их следствий. Измерительные устройства, разумеется, не являются исключением. Поэтому вряд ли стоит удивляться, что, пытаясь проверить законы Ньютона, мы обнаружили, что уже используем законы Ньютона – мы сами положили их в основу нашей теории. Сформулируем теперь вывод

Любая полная проверка оснований теории, не выходящая за рамки этой теории, обречена на неудачу, поскольку под действие этих же законов подпадают и процессы, происходящие с участием измерительных устройств.

Кажется, мы забрались в глубокие теоретические дебри. Настало время вернуться к реальной жизни. Какие бы принципиальные трудности не возникали при проверке фундаментальных положений классической механики, они работают – это факт. Так не стоит ли вместо абстрактного требования полной проверки положить во главу угла основную задачу механики? Действительно, тогда многое становится на свои места. Действие динамометра основано на законах Ньютона? Ну и пусть! Ведь проверять эти законы мы будем не для процедуры измерения, а для другой ситуации. А если так, то не возникает никакого замкнутого круга: законы механики, используемые в измерительных процедурах, являются логически иными объектами, нежели те же законы, проверяемые в эксперименте с участием других тел и измерительных устройств.

В измерительных устройствах и процедурах аксиомы механики неизбежно выступают в качестве определений этих процедур. Тогда в прочих ситуациях эти же аксиомы выступают как физические законы, проверяемые экспериментально. Таким образом, размыкается логический круг в вопросе опытной проверки фундаментальных физических законов.

На этом мне хотелось бы закончить краткий обзор основ классической механики. Конечно же, он получился неполным, но, как мы теперь понимаем — это неизбежно.