Сомсиков А.И.

Как возникают научные заблуждения. На примере классической физики. Описание вращения

Прямолинейное движение и вращение

Прямолинейное движение может быть равномерным или неравномерным, характеризуемым пройденным путем S , скоростью V движения и ускорением a. Каждая из этих физических характеристик может считаться вектором $\vec{S}$, $\vec{V}$ и $\vec{a}$, причем направления векторов $\vec{S}$ и $\vec{V}$ совпадают, а направление векторов $\vec{V}$ и $\vec{a}$ может совпадать или не совпадать, когда движение ускоряется или замедляется.

При круговом вращении в принципе то же самое, но с одним существенным отличием: каждая из этих трех физических величин пропорциональна радиусу вращения r, т.е. у разных точек кругового вращения являются непостоянной величиной, в отличие от прямолинейных движений. Поэтому для него кроме исходных понятий пройденного пути S, скорости V и ускорения a, называемых также *линейными*, вводятся дополнительные физические характеристики – угловой поворот $\propto$, угловая скорость ω и угловое ускорение β.

Используемые наименования

Каждое понятие физики имеет вполне определенный смысл. Не все из них имеют собственные наименования, некоторые могут описываться двумя или более словами, совместно используемыми в качестве наименований.

Для лучшего понимания будем записывать эти словесные обозначения слитно, разделяя их косой чертой, – линейное/перемещение S, линейная/скорость V, линейное/ускорение a и соответственно угловое/перемещение $\propto$, угловая/скорость ω, угловое/ускорение β. Слитное написание означает, что здесь эти два слова выражают ОДНО понятие.

В чем состоит их отличие от соответствующих *линейных* характеристик?

Угловая скорость вращения.

Рассмотрим определение, даваемое в физическом справочнике**.**

«Угловой скоростью вращения твердого тела называется вектор w, численно равный первой производной от угла поворота по времени w=dφ/dt и направленный вдоль оси вращения таким образом, чтобы из его конца вращение тела было видно происходящим против часовой стрелки. Направление вектора w совпадает с направлением поступательного движения буравчика, рукоятка которого вращается вместе с телом.

Источник: Б. М. Яворский, А. А Детлаф, Справочник по физике для инженеров и студентов вузов».

В принципе к самому этому довольно сложному определению претензий нет. Авторы справочника добросовестно повторили то, что написано во всех учебниках физики. И что читателям вроде бы должно считаться понятным. Или все же не очень? Вектор ведь обозначает направление, но чего именно и куда?

Если это движение – то, естественно, именно его направление. При этом характеристика движения не одна. Это может быть как собственно перемещение, так и его скорость и ускорение. Но, прежде всего, посмотрим, каков физический смысл самой этой величины угловой/скорости.

Покажем это по аналогии.

Масса и плотность тел

Ньютон определял понятие массы m как произведение плотности p тела на его объем V. В учебниках физики сообщается, что такое определение массы m является неверным, хотя и не объясняется, почему именно. Само по себе это соотношение, конечно, правильное, но в качестве определения массы оно действительно не годится. Так как сразу же вызывает следующий вопрос: а что означает ПЛОТНОСТЬ? – Величина, определяемая массой? – В науке это называется *логическим кругом*, когда понятие A определяется через B, а само B в свою очередь – через A. Логический круг замыкается.

На деле же понятие массы определяется *двумя* законами физики – законом всемирного тяготения $f = \gamma \frac{mM}{r^2}$ и вторым законом Ньютона $f = ma$. Означающих, что $\gamma \frac{mM}{r^2} = ma$ или $M = \frac{1}{\gamma} ar^2$, где M – масса тела 1, a – ускорение, приобретаемое телом 2, r – расстояние между телами, а γ – размерный коэффициент, не имеющий собственного физического смысла и появляющийся вследствие произвольности выбора единицы массы. Его обозначение греческой буквой гамма γ является просто сокращением слова γравитация.

Поэтому *масса* m_1 *тела 1 есть произведение ускорения* a_2*, приобретаемого телом 2, помещаемым на расстоянии* r *от него, на квадрат этого расстояния (с учетом размерного коэффициента* γ*, определяемого произвольностью выбора единицы массы)* http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8715.html .

В связи с полученным определением, возникает такой вопрос. – А может ли масса m_1 считаться *вектором*? – В принципе, да, если учитывать вектор ускорения $\overrightarrow{a_2}$. Однако направление этого вектора *центрировано* относительно тела 1 и изменяется в зависимости от положения тела 2 на окружающей тело 1 сферической поверхности с радиусом r. Масса действует сразу по всем направлениям, не выделяя какое-то определенное. Поэтому и не должна считаться вектором, то есть является скаляром.

Как правильно отметил Ньютон, масса m тела *пропорциональна* его объему V, то есть $m = kV$, где k – коэффициент пропорциональности, связывающий *разные* физические величины и потому имеющий собственную размерность. Этот коэффициент пропорциональности k и называется ПЛОТНОСТЬЮ тела. Введение понятия плотности понадобилось для выполнения сопоставления между собой масс m_1, m_2 разных тел 1, 2. Притом, что масса m каждого тела пропорциональна его объему V. Можно ли избавиться от этой зависимости? Физически – нет, но можно ее обойти, используя при сравнении масс m_1, m_2 одинаковые объемы $V_1 = V_2$.

Приведение к нужному виду.

Но можно еще привести их реально неодинаковые объемы $V_1 \neq V_2$ к условно одинаковому значению, например, единичному посредством деления величин m_1, m_2 на соответствующие объемы V_1, V_2 с получением отношений $\frac{m_1}{V_1}$ и $\frac{m_2}{V_2}$.

Это называется приведением физических величин к нужному виду.

Вот эти-то получаемые отношения и называются *плотностями* тел 1, 2, теперь уже не зависящими от объемов V_1 и V_2. Так что их можно сравнивать между собой взамен сравнения масс m_1, m_2. Сравниваются, таким образом, уже не сами массы m_1, m_2 тел 1, 2, а их плотности $k_1 = \frac{m_1}{V_1}$ и $k_2 = \frac{m_2}{V_2}$.

Линейные и угловые характеристики

А при сравнении между собой разных вращений выполняется в точности то же самое. Их линейные скорости V и ускорения a пропорциональны радиусу r вращения $V = k_1 r$, $a = k_2 r$, где k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности, обладающие размерностями ввиду различия физических величин V, a и r, поэтому их можно сравнивать между собой только при одинаковых радиусах r.

Или же после приведения к единичному радиусу вращения путем деления на него. С получением ДРУГОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ, имеющей другую физическую размерность. Это понимание несколько затрудняется использованием *одинаковых* наименований – скорости и ускорения, хотя бы и *угловых* взамен *линейных*.

Наименование, выражаемое двумя словами, одно из которых существительное, а другое прилагательное, по правилам русского языка означает, что одно из них, именно – существительное является главным, т.е. *существенным*, другое же – поясняющим или второстепенным. И для носителей русского языка получается, что скорость и ускорение как бы и остаются теми, чем были, лишь с некоторым уточнением. Тогда как на самом деле это совершенно другие физические величины, подобно массе и плотности.

Угловая/скорость есть вовсе не линейная/скорость, а угловое/ускорение – не линейное/ускорение, а ДРУГИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ, всего лишь имеющие сходные наименования, но при этом совершенно другой физический смысл. Поскольку они, в отличие от линейных скорости и ускорения, от радиуса/вращения НЕ ЗАВИСЯТ.

Введение угловых величин перемещения, скорости и ускорения теперь уже позволяют сравнивать между собой разные вращения, независимо от их радиусов/вращения.

Векторы угловых величин

А чем еще различаются сами вращения кроме угловых физических величин? – Как всякое движение – направлением, а также совпадением или несовпадением направлений скорости и ускорения. Если эти направления совпадают, то вращение ускоряется, а если противоположны, то наоборот замедляется. Значит, для правильного их сравнения необходимо учитывать также и направления. Как это делается? Вот изображение, взятое из Интернета, рис. 1.

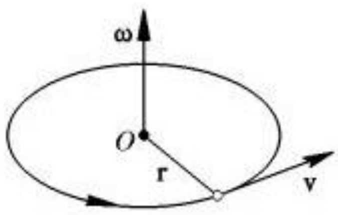


Рис. 1. Векторное изображение угловой и линейной скоростей вращения.

Здесь показано круговое вращение в направлении вектора линейной/скорости $\vec{V}$, величина которой, как уже сказано, пропорциональна радиусу/вращения r. Также добавлена угловая/скорость ω того же вращения, численно определяемая как отношение $\omega = \frac{V}{r}$. Зачем понадобилась сама эта физическая величина ω мы уже знаем, – для приведения линейной/скорости V к единичному радиусу/вращения r, получаемого делением V на r. Полученное значение угловой/скорости ω не зависит от радиуса/вращения r, то есть является одинаковым для любого радиуса. Значит, оно может использоваться как для сравнения различных точек в одном и том же движении на разных радиусах/вращения r_1, r_2, так и для сравнения между собой разных движений с неодинаковыми значениями угловых скоростей ω_1, ω_2.

А что еще можно сказать о векторном понимании $\vec{V}$ и $\vec{\omega}$? О каком именно направлении здесь может идти речь? – С вектором $\vec{V}$ все понятно. Он указывает *реальное* направление вращения точки в точности так же, как и в прямолинейном движении. А что означает вектор $\vec{\omega}$? На рис.1 размеры векторов $\vec{V}$ и $\vec{\omega}$ как и размер радиуса r близки по величине. Что в общем-то затрудняет понимание того, что на самом деле величина вектора $\vec{\omega}$ является отношением $\frac{V}{r}$. То есть прежде всего численно отличается от величины вектора $\vec{V}$. И уже совершенно неясно, что означает направление вектора $\vec{\omega}$, показанное на рис.1. И почему оно выбрано именно таким, а не каким-то иным? На что оно вообще указывает? – Если на какое-то направление, то тогда чего именно? Реальное-то движение ведь направлено совершенно иначе. Непонятно. К тому же еще прилагается довольно сложное правило, как от этого ПРОИЗВОЛЬНО УСТАНОВЛЕННОГО направления вектора $\vec{\omega}$ переходить к *реальному* направлению вращательного движения.

Так называемое «правило буравчика», по которому нужно направлять движение буравчика при его ввинчивании в направлении вектора $\vec{\omega}$, когда вращение рукоятки буравчика покажет истинное направление кругового движения. То есть сначала мы САМИ ОТХОДИМ от правильного направления вращательного движения к произвольно выбранному направлению вектора $\vec{\omega}$, чтобы затем уже, пользуясь этим тоже вполне искусственным правилом, возвращаться обратно к правильному направлению вращения. А если при этом еще и резьбу самого буравчика случайно или нарочно поменять с правой на левую? Об этом ведь тоже необходимо помнить, чтобы все на свете не перепутать. Ну, и к чему все это искусственное нагромождение сложностей? Ведь физически-то направление вектора $\vec{\omega}$ точно такое же как и самого вектора $\vec{V}$, из которого он, собственно говоря, и получен. Разница заключается только лишь в их размерах, а вовсе не в направлении. Чего, кстати сказать, на сам*о́*м рис. 1 в общем-то и не видно.

Объяснение выбора направления угловых векторов.

Всему этому может быть дано только одно разумное объяснение. Выбор направления вектора $\vec{\omega}$ объясняется нежеланием усложнения изображения с двумя векторами $\vec{V}$ и $\vec{\omega}$ при совпадении их направлений и аналогично – двумя векторами линейного и углового ускорений тоже при совпадении их направлений. Поэтому и решили их *зрительно* разделить, направив угловые векторы по координатной оси, перпендикулярной плоскости вращения с УТРАТОЙ понимания *физического смысла* этих угловых векторов и усложнением обратного перехода от произвольно выбранного их направления к реальному вращению.

Но нужно помнить, что ничего этого ФИЗИЧЕСКИ вовсе не нужно, и эти условные направления, установленные якобы для большей наглядности, не проясняют, а наоборот затрудняют и даже запутывают этот, в общем, довольно простой вопрос.

Равномерное вращение

В равномерном вращении, также как и равномерном прямолинейном движении, представляющем частный случай *инерционного кругового* движения при радиусе кривизны $R \to \infty$ http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8444.html , ускорение a всюду равно нулю, т.к. линейная скорость V вращения постоянна по величине $V = const$, хотя и непостоянна по направлению, а возникающее центробежное ускорение $a_{цб}$ строго уравновешено центростремительным ускорением $a_{цс} = -a_{цб}$, создаваемым силой f тяготения или реакции связи, направленнной к центру вращения http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8713.html .

Неравномерное вращение

Рассмотрим теперь другой случай – неравномерного вращения. В таком движении линейное и угловое ускорения не равны нулю.

В неравномерном вращении в добавление к характеристикам равномерного вращения вводятся дополнительные физические характеристики: *момент силы*, *момент инерции*, *момент количества движения*, *импульс момента сил*.

Посмотрим, как это излагаются в учебниках физики. Воспользуемся учебником, по которому я сам когда-то учился.

С. Э. ФРИШ и А. В. ТИМОРЕВА

КУРС
ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

ТОМ I

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

ИЗДАНИЕ ОДИННАДЦАТОЕ,
СТЕРЕОТИПНОЕ

Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования РСФСР
в качестве учебника для государственных
университетов

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1962

Фриш Сергей Эдуардович
и Тиморева Александра Васильевна
Курс общей физики, том I
Л., Физматгиз, 1962, стр. 468, с илл.
Редакторы:
Ю. В. Новожилов и *Л. И. Орлова*
Техн. редактор *А. А. Лукьянов*
Корректор *Л. А. Любович*

Подписано к печати с матриц 15/I 1962 г.
Бумага $60 \times 92^1/_{16}$. Физ. печ. л. 29,25.
Усл. печ. л. 29,25. Уч.-изд. л. 29,84.
Допечатка тиража 100 000 экз.
Цена 1 р. 00 к. Заказ № 1265.

Государственное издательство
физико-математической литературы
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Ленинградский Совет народного
хозяйства. Управление полиграфической
промышленности. Типография № 1
«Печатный Двор» им. А. М. Горького.
Ленинград, Гатчинская, 26.

◇ ◇

ИСПРАВЛЕНИЕ
НА ТИТУЛЬНОМ ЛИСТЕ

Напечатано: Издание одиннадцатое, стереотипное.
Должно быть: Издание десятое, стереотипное.

Это *университетский* учебник, выдержавший 10 стереотипных изданий при тираже 100 000 экземпляров. Значит, его читали как минимум миллион студентов, усваивающих эти вопросы физики. С него мы и начнем.

Рассмотрим первый фрагмент.

§ 35. Вращение твердого тела. Момент силы и момент инерции. При рассмотрении вращения твердого тела с динамической точки зрения наряду с понятием о силах вводится *понятие о моментах сил* и наряду с понятием о массе — *понятие о моменте инерции.* Для того чтобы выяснить содержание понятий — момент сил и момент инерции, рассмотрим сперва движение одной материальной точки A с массой m, удерживаемой на окружности радиуса r с помощью какой-либо связи (рис. 72). Пусть на точку A действует постоянная по величине сила **f**. Тогда точка A приобретает постоянное тангенциальное ускорение w_t, определяемое тангенциальной составляющей f_t:

$$f_t = f\cos\alpha = mw_t. \qquad (1)$$

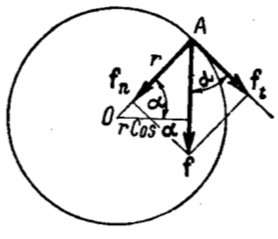


Рис. 72. Вращение точки A по окружности.

Нормальная составляющая силы **f** совместно с реакцией связи создает нормальное ускорение.

Введем угловое ускорение $\beta = \frac{w_t}{r}$, тогда равенство (1) заменится выражением:

$$f\cos\alpha = mr\cdot\beta;$$

умножим правую и левую части этого выражения на r, получим:

$$fr\cos\alpha = mr^2\cdot\beta. \qquad (2)$$

Произведение $r\cos\alpha$ равно длине перпендикуляра, опущенного на направление силы из точки O (рис. 72). Величина

$$M = fr\cos\alpha, \qquad (3)$$

численно равная произведению величины силы f на длину перпендикуляра, опущенного на направление силы из точки O (центра вращения), называется *моментом силы относительно точки O.*

Величина

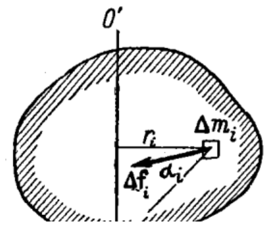
$$I = mr^2, \qquad (4)$$

численно равная произведению массы m точки A на квадрат ее расстояния от точки O (центра вращения), называется *моментом инерции точки A относительно точки O.*

Вводя момент силы M и момент инерции I, перепишем равенство (2):

$$M = I\beta. \qquad (5)$$

Сравнивая равенства (1) и (5), видим, что угловое ускорение β таким же образом связано с моментом силы M и моментом инерции I, каким линейное ускорение w_t связано с силой f_t и массой m точки A. При описании вращательного движения с помощью углового ускорения β роль силы играет момент силы M, роль массы m — момент инерции I. Под влиянием сил с равными моментами точка A приобретает равные угловые ускорения β. Таким образом, *различные силы* **f** *эквивалентны в смысле вызываемого ими вращения, если равны их моменты.* Разные материальные точки получают под влиянием равных моментов сил одинаковые угловые ускорения, если одинаковы их моменты инерции. Таким образом, *материальные точки с разными массами m эквивалентны в смысле приобретаемого ими углового ускорения, если равны их моменты инерции.*



Здесь необходимо следующее пояснение.

В данном случае сила $\boldsymbol{f}$ и ее тангенциальная составляющая f_t обе *постоянны* по величине, чем определяется тоже *постоянное* тангенциальное ускорение w_t по формуле (1).

При этом угол $\propto$ тоже является постоянным, а значит сила $\boldsymbol{f}$ постоянна по величине, но непостоянна по направлению, т.к. она тоже вращается вместе с самой жесткой связью по окружности с радиусом r. Поэтому угол $\propto$ *не является* углом поворота материальной точки A по окружности (последний на рис. 72 вообще не показан).

Другое пояснение касается выражения «Нормальная составляющая силы $\boldsymbol{f}$ *совместно с реакцией связи* создает нормальное ускорение». На деле же деле нормальная составляющая $\boldsymbol{f_n}$ силы $\boldsymbol{f}$ создает нормальное ускорение $\boldsymbol{w_n}$, *компенсируемое* реакцией связи $\boldsymbol{w_{св}} = -\boldsymbol{w_n}$, вследствие чего результирующий вектор ускорения $\boldsymbol{w_{рез}} = \boldsymbol{w_n} + \boldsymbol{w_{св}} = \boldsymbol{w_n} - \boldsymbol{w_n} = 0$. Поэтому никакое движение в направлении вектора $\boldsymbol{f_n}$ не происходит.

То есть на рис.72 представлено *равноускоренное круговое* вращение, которое как всякое равноускоренное движение не может быть бесконечным. Такое вращение соответствует *началу* движения до его перехода к равномерному вращению при силе $\boldsymbol{f} = 0$.

Далее, прокомментируем выражение «Введем угловое ускорение $\beta = \frac{w_t}{r}$ ». Ввести-то, конечно, можно, но для чего и что это значит? В чем смысл такого введения? Что означает эта величина, каков ее физический смысл? – Ответ таков. Это необходимо как для сравнения между собой круговых движений различных точек с неодинаковыми радиусами r, так и для сравнения различных круговых движений. В чем здесь проблема? – В круговом движении, в отличие от прямолинейного, пройденный путь S, скорость движения V и ускорение a у разных точек, имеющих разные радиусы вращения r, пропорциональны этим радиусам r. То есть *не сохраняют* постоянства значений $S = k_1 r,\ V = k_2 r,\ a = k_3 r$, где $k_1,\ k_2,\ k_3$ – коэффициенты пропорциональности. Причем эти коэффициенты, за исключением k_1, не просто числовые, т.е. математические, что возможно у разных величин одинакового физического смысла, а *физические*, поскольку члены этих пропорций имеют *разный* физический смысл и неодинаковые размерности.

Поэтому сопоставления для разных точек или разных движений необходимо вести либо при одинаковом значении радиуса r, либо по другим физическим характеристикам, НЕЗАВИСЯЩИМ от него. Такими физическими характеристиками, не зависящими от радиуса r, как раз и являются эти физические коэффициенты пропорциональности k_1, k_2 и k_3.

Они называются соответственно: k_1 – угловое/движение, k_2 – угловая/скорость, k_3 – угловое/ускорение. То есть это физические величины, определяемые по формулам $k_1 = \frac{S}{r}$, $k_2 = \frac{V}{r}$, $k_3 = \frac{a}{r}$. В отличие от $S,\ V$ и a, они уже *не зависят* от радиуса r и потому могут использоваться для сравнения между собой любых круговых движений и при любых радиусах вращения.

Само же взятие этих отношений $\frac{S}{r}$, $\frac{V}{r}$, $\frac{a}{r}$ называется *приведением* линейных характеристик движения $S,\ V,\ a$ к заданному, в данном случае – единичному радиусу вращения r.

В этом и состоит физический смысл введения углового/ускорения $\beta = \frac{w_t}{r}$, никак не объясняемого в приводимом фрагменте.

Далее, вводится величина $M = f_t r$, называемая ***моментом силы*** относительно точки O. Слово *момент* относится к категории *времени*, поэтому здесь его использование не вполне понятно и требует объяснения. Поскольку M в данном случае величина ***постоянная***, независящая от ***момента*** времени.

Также вводится и другая величина $I = mr^2$, называемая ***моментом инерции*** точки A относительно точки O. Здесь она тоже является ***постоянной*** величиной, не зависящей от ***момента*** времени. Поэтому слово ***момент***, используемое в обоих случаях, выглядит непонятным.

И обе эти дополнительные физические величины введены только лишь для того, чтобы получить эту зависимость: $M = I\beta$, где β – угловое ускорение, равное $\beta = \frac{w_t}{r}$, аналогично тому, как сила f в линейном движении связана с массой m ускорением w материальной точки A по второму закону Ньютона ($f = mw$).

Такое изложение *неэвристично*, т.е. не дает представления о ходе мысли, приведшем к введению этих дополнительных характеристик.

Терминология

Сначала рассмотрим сами эти названия.

Момент силы (синонимы: крутящий момент, вращательный момент, вертящий момент, вращающий момент).

Каков физический смысл понятия *момент/силы*? Читатель, ищущий ответ на такой вопрос во всякого рода словарях, технических справочниках или учебниках сразу столкнется в дополнительной трудностью – стремлением этих источников давать ответ предпочтительно *в общем* и даже *наиболее общем виде*, с которым желающему придется долго и утомительно разбираться. А нужно делать ровно наоборот – начать с простейшего пусть частного случая, зато понятного. При этом определение момента/силы окажется довольно простым, даже элементарным: это произведение действующей/силы f_t на *плечо/силы* или *плечо/рычага*. А это что такое – *плечо/силы*? – Здесь тоже довольно просто – это обозначение наименьшего/расстояния от линии/действия/силы до центра или оси/вращения. Сила направлена по прямой, а точка ее приложения может находиться в любом месте этой прямой. Поэтому задается не расстояние от точки приложения силы до центра или оси/вращения, а наименьшее/расстояние от этой прямой. Оно-то и называется плечом/силы или плечом/рычага. Как если бы здесь действительно был рычаг h_1 или h_2, к концу которого приложена сила F рис. 2.

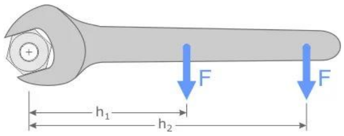


Рис. 2. Плечо/силы или плечо/рычага h_1 или h_2.

На рис.3 показаны две силы $\overrightarrow{F_1}$ и $\overrightarrow{F_2}$ и соответствующие им плечи/силы или плечи/рычага I_1, I_2. Это изображение правильное.

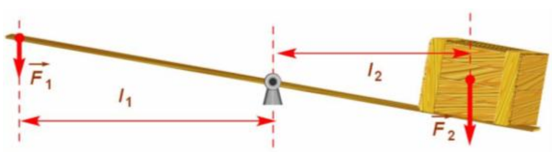


Рис. 3. Плечо/силы или плечо/рычага (правильное изображение)

А на рис. 4 плечи/силы или плечи/рычага изображены неправильно. Автор рисунка в вопросе не разобрался.

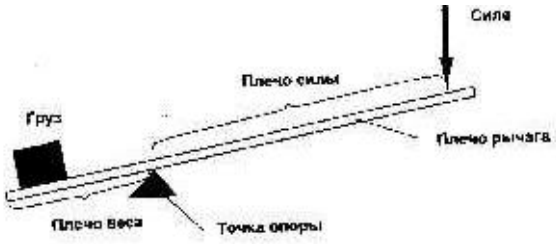


Рис.4. Плечо/силы или плечо/рычага (неправильное изображение)

Итак, на рис. 72 *момент/силы* M есть произведение действующей/силы f_t на *плечо/силы* или плечо/рычага. В данном случае плечо/силы есть просто радиус/вращения r.

То есть $M = f_t r$. С этим понятно.

А теперь главный вопрос: «Зачем это понадобилось?» – А вот зачем.

Но чтобы правильно ответить на этот вопрос, необходимо, прежде всего, дать физическую модель движения, соответствующая этому изложению.

Правильная модель движения.

Вот эта модель рис. 5.

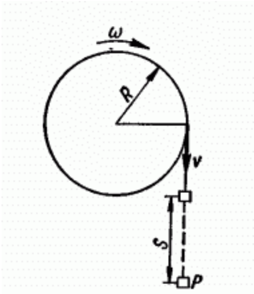


Рис. 5. Модель движения, описываемого в учебнике.

Что здесь показано? – Диск с массой m и радиусом R, приводимый в движение с помощью груза, соединенного с ним посредством накрученной на него нити. Груз движется вертикально вниз под действием силы/тяготения P, приводя этот диск в равноускоренное/вращение. В данном случае сила/тяготения P и является той самой тангенциальной/составляющей f_t, о которой идет речь на рис. 72 учебника. Теперь понятно, почему она является постоянной величиной. Ведь это же просто постоянный вес P груза.

В таком равноускоренном/движении линейная/скорость V пропорциональна линейному/ускорению a и времени t движения: $V = at$, а пройденный путь S удовлетворяет соотношению $S = \frac{at^2}{2}$. Но для вращающегося диска не это главное. А важно то, что, в отличие от поступательного движения, все точки которого имеют *одинаковую* скорость V, линейная/скорость V вращательного/движения у разных точек диска является неодинаковой, т.е. *непостоянной* величиной, пропорциональной радиусу R. В центре/вращения, например, $V = 0$. А одинаковой, не зависящей от радиуса R, т.е. *постоянной* величиной является отношение $\frac{V}{R}$, называемое *угловой/скоростью* ω вращения: $\omega = \frac{V}{R}$. Вот этой-то угловой/ скоростью ω все виды вращения и различаются между собой. А значит, угловая/скорость ω придумана и введена вовсе не просто так, а для различения или сравнения между собой разных вращений.

А что можно сказать об ускорении a? – В равноускоренном/движении линейное/ ускорение a пропорционально скорости V по формуле $a = \frac{V}{t}$, где t – время/движения.

А скорость V у разных точек вращающегося диска, как уже сказано, неодинакова и определяется радиусом R по формуле $a = kR$. Поэтому ускорение $a = \frac{V}{t} = \frac{kR}{t}$. То есть точно так же является непостоянным, определяемым радиусом R. А постоянным для любого радиуса R является отношение $\frac{a}{R}$, называемое *угловым/ускорением* β, то есть $\beta = \frac{a}{R}$.

Введение этого углового/ускорения β, как и угловой/скорости ω не произвольно, а необходимо для описания равноускоренного/вращения для любой точки диска на любом радиусе R вращения.

Итак, для любой точки неравномерного поступательного/движения используются понятия линейной/скорости V и линейного/ускорения a, а для любой точки неравномерного/вращения – угловой/скорости ω и углового/ускорения β.

Формальное описание

Чтобы перейти теперь от тангенциальной/составляющей f_t действующей силы f к моменту/силы M на рис.72 нужно просто умножить эту величину f_t на плечо/силы или плечо/рычага. В данном случае на r. Для чего обе части формулы $f_t = ma = mr\beta$ умножаем на r и получаем: $f_t r = mr^2\beta$.

Или $M = mr^2\beta$. Выражение mr^2 названо моментом/инерции I, т.е. $I = mr^2$. Здесь это постоянная величина. Может быть, лучше бы ее назвать просто *инерцией*? Итого получаем: $M = I\beta$.

В поступательном/движении по второму закону Ньютона $f = ma$, а во вращательном – $M = I\beta$, где сила f_t заменяется моментом/силы M, где $M = f_t r$, масса m – моментом/инерции I, где $I = mr^2$, а линейное/ускорение a – угловым/ускорением β.

Итак, в поступательном/движении сила f равна произведению массы m на ускорение a, а во *вращательном* – момент/силы M равен произведению момента/инерции I на угловое/ускорение β.

Это выражение *второго закона Ньютона* не для поступательного, а для вращательного движения. Для любой его точки вращения.

Действительно, $M = f_t r$, $I = mr^2$, $\beta = \frac{a}{r}$. Подставим эти физические значения в формулу $M = I\beta$. Получим $f_t r = mr^2\frac{a}{r}$. Или, после сокращения на r, окончательно $f_t = ma$.

Это обычный второй закон Ньютона, всего лишь освобожденный от необычной записи.

Дополнительный комментарий

Теперь, когда мы неожиданно может быть даже для самих себя обнаружили, что перед нами всего лишь другая форма записи того же самого второго закона Ньютона, спросим себя: ну, и зачем все это? – Что нам дает введение новых физических характеристик – момента/силы $M = f_t r$, момента/инерции $I = mr^2$ и даже углового/ускорения $\beta = \frac{a}{r}$?

Что нам мешало до этого? – Зависимость линейной/скорости V и линейного/ускорения a от плеча/рычага r, с которой мы в общем-то и решили побороться? – Введя для этого угловые скорость ω и ускорение β, теперь уже независимые от r? – Прекрасно, но просто так ввести β взамен a НЕЛЬЗЯ, иначе ведь этим нарушится справедливость второго закона Ньютона. Поэтому пришлось одновременно с введением углового ускорения β вводить также и дополнительный множитель r, т.е. $f_t = mr\beta$, поскольку $f_t = mr\frac{a}{r} = ma$. И что, избавились мы теперь от этой самой зависимости от r? – Ничуть, просто умножили числитель и знаменатель на одну и ту же величину r, а равенство при этом осталось ведь тем же самым. Затем ввели дополнительное понятие – момента/силы M. Для этого умножили f_t на то же самое плечо/силы r, а также умножили другую часть равенства на эту же самую величину r. Чтобы получить теперь новое выражение $f_t r = mr^2\beta$. И заменяя в нем всего лишь обозначения, имеем в итоге этих ТОЖДЕСТВЕННЫХ преобразований выражение: $M = I\beta$. Ну, и что в этом нового? – Ведь это тот же самый второй закон Ньютона, но лишь в другой форме записи, то есть в других обозначениях. Обманываем сами себя, делая вид, будто получили какой-то другой, якобы новый результат?

Я уже приводил подобный пример такого же самообмана. Где *одна и та же зависимость* выражается в двух разных формах записи – в виде геометрической теоремы Пифагора $a^2 + b^2 = c^2$ и в формуле тригонометрии $sin^2 \propto + cos^2 \propto = 1$, притом даже искусственно относимых к *разным* наукам, якобы выражающих неодинаковый результат http://www.sciteclibrary.ru/cgi-bin/public/YaBB.pl?num=1501411831 .

Скаляры и векторы

Дополнительное различие, крайне затрудняющее понимание, состоит в следующем.

В поступательном движении по второму закону Ньютона действующая сила f может считаться *вектором* $\vec{f}$, направление которого определяется вектором ускорения $\vec{a}$. При этом масса m является просто *скаляром*.

А во вращательном движении всё уже совершенно не так. Здесь вектор линейного/ускорения $\vec{a}$ заменяется вектором углового/ускорения $\vec{\beta}$, направление которого не только не совпадает с направлением вектора силы $\vec{f}$, но и является ему перпендикулярным. Впрочем, что означает *является*? Правильнее сказать – *условились считать* перпендикулярным. А почему это?

Вспомним, как вообще появляется угловое ускорение? – Поскольку разные точки вращения имеют неодинаковое числовое значение линейного/ускорения a, – с целью их приведения к *одинаковому* числовому значению. Подчеркиваем: ЧИСЛОВОМУ значению. А причем здесь направление этого вектора? Математически можно, конечно, задать ему любое направление, однако физически это же вовсе не так. Иначе просто утрачивается физический смысл углового/ускорения β. Который в общем-то тот же самый, что и у линейного ускорения a, кроме его числового значения. И, стало быть, вектор $\vec{\beta}$ вовсе не сам по себе направлен, а его ***решили направить*** именно так, а не иначе.

И в точности так же момент/инерции I, определяемый зависимостью $I = mr^2$, физически полностью аналогичен массе m второго закона Ньютона для поступательного движения, то есть должен считаться скаляром, а не вектором. Но его тоже почему-то велено считать вектором $\vec{I}$, которому нужно, естественно, придать еще и какое-то направление. А потому сам вектор момента/силы $\vec{M}$ определяется уже не одним вектором углового/ускорения $\vec{\beta}$, а двумя векторами $\vec{I}$ и $\vec{\beta}$, т.е. становится их векторным/произведением. Которому для однозначности нужно придать еще и какое-то направление, совпадающее или не совпадающее с одним из этих двух векторов или ни с одним из них. Решили так – направление вектора момента/силы $\vec{M}$ *перпендикулярно* плоскости, образуемой двумя этими исходными векторами $\vec{I}$ и $\vec{\beta}$. Притом нужно еще дополнительно установить – в какую именно сторону от этой плоскости.

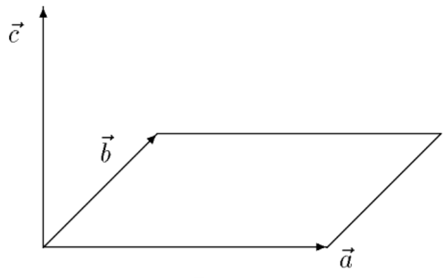


Рис. 6. Векторное/произведение $\vec{c}$ векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$.

Введя дополнительно *правила/буравчика* для установления этого направления. А если в этом буравчике поменять правую/резьбу на левую, – придется что, изменять целый закон физики? – Не проще ли было изменить само это изложение, отказавшись от векторного/произведения как от излишнего и главное совершенно *ненужного* усложнения?

Словом, возникла целая довольно сложная наука на основе пространственных представлений. С утратой исходного понимания того, что речь здесь идет всего лишь о форме записи второго закона Ньютона применительно к вращательному/движению.

Здесь яркий пример путаницы, внезапно возникшей в самой науке. При невозможности разобраться во всем этом для целых поколений учащихся. А нужно было всего лишь вернуться к исходному *скалярному* пониманию момента/инерции I аналогично скалярному пониманию массы m. Без всяких векторных/произведений, лишь затуманивающих суть вопроса.

Следующий фрагмент.

§ 37. Момент количества движения. Рассмотрим первоначально материальную точку с массой m, вращающуюся по окружности радиуса r (рис. 72). Для такой точки имеет место соотношение:

$$f \cos \alpha = m w_t, \tag{1}$$

где f — сила, действующая на точку, а w_t — тангенциальная составляющая ее ускорения. Предположим, что сила f постоянна по величине и составляет один и тот же угол α с касательной к окружности во всех точках пути.

Тогда $w_t = \Delta v / \Delta t$, и равенство (1) принимает вид:

$$f \cos \alpha \cdot \Delta t = m \, \Delta v.$$

Умножая правую и левую части этого выражения на r, получим

$$fr \cos \alpha \cdot \Delta t = rm \, \Delta v. \tag{2}$$

Величина $fr \cos \alpha$ представляет собой момент M силы f относительно центра вращения O; кроме того, ввиду постоянства массы m и радиуса r, выражение $rm \, \Delta v$ можно переписать в виде $\Delta (rmv)$.

Тогда равенство (2) примет вид:

$$M \, \Delta t = \Delta (rmv). \tag{3}$$

Если момент сил M непостоянен, то в выражении (3) следует брать столь малый промежуток времени Δt, чтобы в течение этого промежутка времени момент сил M мог считаться постоянным. Для конечного промежутка времени можно ввести в рассмотрение среднее значение момента сил $\overline{M}$ и тогда

$$\overline{M} \, \Delta t = \Delta (rmv). \tag{3a}$$

Величина $p = rmv$ называется *моментом количества движения* материальной точки, вращающейся по окружности, а $\overline{M} \, \Delta t$ — *импульсом момента сил*. Равенство (3) утверждает, что *изменение момента количества движения численно равно импульсу приложенного момента сил*. Оно аналогично равенству (4) § 17, выражающему связь между изменением количества движения и импульсом силы.

Здесь выражение $f_t r = mrw_t = mr\frac{\Delta V}{\Delta t}$ сначала приводится к виду $f_t r \Delta t = mr\Delta V$.

Или $M\Delta t = \Delta(mrV)$, поскольку mr является постоянной величиной.

Произведение mrV названо *моментом/количества/движения* p, т.е. $p = mrV$ и соответственно $\Delta p = \Delta(mrV)$ – это его изменение за промежуток времени Δt. Произведение $M\Delta t$ названо *импульсом/момента/силы*. Требуется просто запоминать, что *изменение момента/количества/движения* Δp *численно равно приложенному импульсу/момента/силы* $M\Delta t$.

Зачем все это нужно по-прежнему непонятно.

И наконец последний, третий фрагмент.

Из формул (3) и (4) следует, что *при отсутствии момента сил* ($M = 0$) *момент количества движения остается постоянным*. Это следствие известно под названием *закона сохранения момента количества движения*.

В частном случае движения материальной точки по окружности имеем из (3) при $M=0$:

$$mvr = \text{const}. \qquad (5)$$

В общем случае движения материальной точки при $M=0$:

$$\mathbf{r} \times m\mathbf{v} = \text{const}. \qquad (6)$$

Для твердого тела из (4) при $M=0$ следует:

$$I \cdot \omega = \text{const}. \qquad (7)$$

В случае неизменного момента инерции, при отсутствии внешних сил, угловая скорость вращающегося тела остается постоянной; этот результат мы уже получали непосредственно из формулы (6а) § 35.

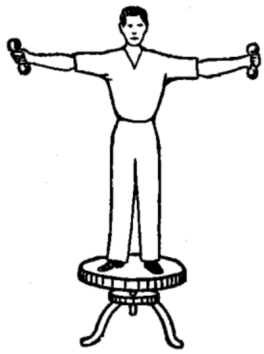


Рис. 81. При опускании рук с гирями человек начинает вращаться скорее.

Если, при отсутствии внешних сил, меняется момент инерции, то начинает меняться и угловая скорость ω, так что произведение $I\omega$ остается постоянным: если момент инерции I возрастает, то угловая скорость ω убывает, и наоборот.

Сохранение момента количества движения может быть продемонстрировано с помощью человека, стоящего на скамеечке, могущей без трения вращаться вокруг вертикальной оси („скамья Жуковского“). Пусть человек, держащий в расставленных руках гири (рис. 81), приведен вместе со скамеечкой во вращение с угловой скоростью ω. При этом человек имеет определенный момент количества движения $I\omega$, который, при равенстве нулю момента внешних сил, должен сохраняться. Если человек опустит руки, то его момент инерции уменьшится, в результате этого возрастет угловая скорость его вращения ω. Если человек снова поднимет руки, то угловая скорость ω примет прежнее значение.

Момент количества движения $\mathbf{P} = I\boldsymbol{\omega}$ есть величина *векторная*, имеющая то же направление, что и вектор угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$.

Дополнительный комментарий

Здесь момент/силы $M = f_t r$ может быть равен нулю в том случае, когда сила $f_t = 0$. То есть при равномерном/вращении с постоянной линейной/скоростью V. Удовлетворяющая условию постоянства момента/количества/движения $p = mVr = const$. Откуда $V = \frac{const}{mr} = \frac{const_1}{r}$ – при равномерном вращении тела с массой m его линейная/скорость V обратно пропорциональна радиусу/вращения r.

Это единственное практическое применение вводимых понятий и их обозначений. С увеличением радиуса r скорость V вращения уменьшается и обратно. Что и демонструируется рис. 81.

Но как при этом можно увеличить или уменьшить радиус r при равномерном вращении с постоянной линейной/скоростью $V = const$? При равенстве центробежной силы $f_{цб}$, определяемой зависимостью $f_{цб} = \frac{mV^2}{r}$ и центростремительной силы $f_{цс}$, определяемой противодействием *связи*? – Ответ – никак, если только искусственно не нарушить равенство $f_{цс} = -f_{цб}$, введя при этом дополнительную силу $\pm\Delta f$. Как ее при этом назвать – *внешней* или *внутренней*, в общем-то, безразлично. В зависимости от направления этой дополнительной силы Δf и времени ее действия, радиус/вращения r и соответственно линейная/скорость V уменьшается или же возрастает.

Рассмотрим подробнее это высказывание.

Если, при отсутствии внешних сил, меняется момент инерции, то начинает меняться и угловая скорость ω, так что произведение $I\omega$ остается постоянным: если момент инерции I возрастает, то угловая скорость ω убывает, и наоборот.

Сказано слишком коротко и потому непонятно.

Какая вообще связь внешней силы f_t с моментом инерции I? Будет ли внешняя сила f_t больше нуля $f_t > 0$, меньше нуля $f_t < 0$ или равна нулю $f_t = 0$, из определения $I = mr^2$ такое различие не вытекает. Также непонятно, какая из имеющихся иллюстраций подразумевается. Исходный рис. 72 выглядит *вертикальным* вращением. Нами предложен рис. 5 с таким же вертикальным вращением, полностью соответствующим рис. 72. Однако на рис.81 показано теперь уже горизонтальное вращение. Что уже требует некоторого пояснения.

Далее, в чем состоит разница *внешних* и *внутренних* сил, и что это такое вообще? И как может изменяться момент инерции *в отсутствие сил*? На рис. 81 изменение момента инерции ведь очевидно сопровождается приложением сил. Пускай и названных *внутренними*.

Словом, перед нами псевдообъяснение. Возможно, оно понятно тому, кто знает это лучше самого объясняющего. А изучающему это впервые определенно понадобятся пояснения.

Изложим это еще раз своими словами.

Полагаю, рис. 5 может соответствовать требованию отсутствия внешних сил, если на нем мысленно обрезать нить. Но лучше все же предложить другую схему вращения, ближе к рис.81.

Возьмем для этого плоский диск с массой M с возможностью свободного его вращения относительно вертикальной оси. Поверх этого диска поместим спицу с надетой на нее гайкой, с возможностью совместного или независимого ее вращения относительно той же самой вертикальной оси. Масса гайки m должна быть много меньше массы M плоского диска $m << M$, а масса спицы m_1 свою очередь много меньше массы m гайки $m_1 << m$. Зачем это нужно, поясним в ходе дальнейшего изложения. Гайка может закрепляться на этой спице или свободно перемещаться относительно нее. Вначале жестко свяжем вращение спицы с закрепленной на ней гайкой с вращением самого диска. Приведем этот диск в равномерное вращение с угловой/скоростью ω. Спица вместе с закреплённой ней гайкой при этом тоже приобретет угловую/скорость ω. При равномерном вращении диска вместе со спицей на гайку действуют две уравновешивающие друг друга силы – центробежная/сила $f_{цб}$, определяемая по формуле $f_{цб} = ma_{цб} = m\frac{V^2}{r}$, где $a_{цб}$ – центробежное/ускорение, V – линейная/скорость вращения гайки, r – ее радиус/вращения, и равная ей по величине и противоположная по направлению центростремительная/сила $f_{цс}$, определяемая как

$f_{цс} = -f_{цб}$, называемая *реакцией связи*. При этом совместная угловая/скорость диска, спицы и гайки составляет $\omega = \frac{V}{r}$.

Введем теперь первое изменение. Прервем жесткую связь гайки со спицей, обеспечив возможность свободного ее перемещения относительно спицы. При этом центробежная/сила $f_{цб}$, определяемая линейной/скоростью V движения гайки и ее радиусом/вращения r полностью сохранится, а центростремительная/сила $f_{цс}$ после устранения связи гайки со спицей тотчас исчезнет $f_{цс} = 0$. Под действием единственной оставшейся силы $f_{цб}$ гайка придет в ускоренное движение вдоль спицы в направлении увеличения радиуса/вращения r. При сохранении угловой/скорости $\omega = const$ ее вращения, определяемой диском и спицей, линейная скорость V вследствие увеличения радиуса/вращения r будет непрерывно возрастать $V = \omega r = (const){\cdot}r$. То есть движение по касательной к траектории кругового вращения становится теперь уже не равномерным, а ускоренным. С ускорением $a_к$, вызываемым силой $f_к$, направление которой определяется направлением линейной/скорости V. Эта сила $f_к$ называется *силой/Кориолиса*.

Обычно ее объясняют на примере речного течения, направленного по земному меридиану, в Северном полушарии – с севера на юг (а в южном – наоборот). Вода речного течения при этом тоже ускоренно движется вследствие земного вращения, создающего центробежную силу $f_{цб}$ речного течения даже на равнинной местности, называемой также *эквипотенциальной поверхностью*, и вместе с ней также и силу/Кориолиса $f_к$ действующую на это речное течение в направлении с Запада на Восток. Само же речное течение по третьему закону Ньютона в свою очередь создает силу/противодействия $f_{пр}$, равную по величине и противоположную по направлению силе/Кориолиса $f_к$, то есть $f_{пр} = -f_к$. При этом, ввиду неравенства масс – текущей речной воды m и массы Земли M, где $m \ll M$, сила/противодействия $f_{пр}$ речного течения не может изменить угловую/скорость $\omega_З$ вращения Земли и может только лишь подмывать правый берег реки с постепенным ее смещением с Востока на Запад, если это позволяют условия равнинной местности.

И точно так же в рассматриваемой нами модели вращения, где масса гайки m по определению много меньше массы M вращающегося диска $m \ll M$, движение гайки вдоль спицы, сопровождаемое увеличением ее линейной скорости V за счет воздействия силы/Кориолиса $f_к$, не изменяет собственной силой/противодействия $f_{пр} = -f_к$ угловую скорость вращения ω диска со спицей $\omega = const$.

Введем теперь второе изменение. Прервем связь спицы с вращающимся диском с возможностью свободного ее вращения относительно вертикальной оси. При этом сразу же исчезнет и сила/Кориолиса $f_к = 0$, создаваемая вращающимся диском перпендикулярно спице. В отсутствие силы/Кориолиса $f_к = 0$ при движении гайки вдоль спицы под действием центробежной/силы $f_{цб}$ линейная/скорость V движения более не изменяется $V = const$, хотя ее радиус/вращения r по-прежнему возрастает.

Значит угловая/скорость ω вращения спицы с гайкой становится равной $\omega = \frac{V}{r} = \frac{const}{r}$, то есть обратно пропорциональной радиусу/вращения r. При возрастании радиуса/вращения r гайка препятствует вращению спицы, оказывая на нее силу торможения $f_т$. Спица в свою очередь оказывает на гайку силу/противодействия $f_{пр}$, соответствующую силе/Кориолиса. Однако, ввиду заведомого неравенства масс гайки m и спицы m_1 ($m_1 << m$) это ее противодействие не изменяет угловую/скорость ω, также как и речное течение не изменяет земное вращение.

Введем теперь последнее третье изменение. Представим на конце спицы, куда теперь движется гайка площадку с пружиной, куда она может удариться в режиме упругого столкновения. Приобретя при этом скорость/движения V_2 вдоль спицы равную по величине и противоположную по направлению скорости V_1 до начала упругого столкновения $V_2 = -V_1$. Гайка при этом начнет двигаться вдоль спицы в обратном направлении, причем угловая/скорость ω ее вращения вместе со спицей в силу сохранения той же самой зависимости $\omega = \frac{const}{r}$ теперь уже будет не уменьшаться, а увеличиваться. До ее сближения с осью вращения, где тоже может быть установлена такая же площадка с пружиной. При этих прямых и обратных перемещениях гайки возникнет неравномерное круговое вращение спицы при возрастании или уменьшении ее угловой/скорости ω, подобное колебаниям линейного маятника. Практически, конечно, затухающее из-за наличия сопротивления трения. Вот что подразумевает окончание фразы «*угловая скорость ω убывает и наоборот*» в выделенном нами фрагменте текста учебника.

Дополнительный комментарий

Посмотрим теперь иллюстрацию этой зависимости на рис. 81. Здесь масса M самого человека много больше масс m каждой его руки. Она находится на вертикальной оси вращения, т.е. имеет малую линейную/скорость V. Центры масс m каждой руки расположены примерно посередине, т.е. в районе локтя. Это их максимально возможное удаление от оси вращения. При сгибании рук в локте центр масс каждой руки удаляется от центра вращения на четверть ее длины, а при их опускании удаление становится минимальным. Этим имитируется движение гайки по спице с возможностью изменения угловой скорости ω вращения. Однако такое сгибание и разгибание рук и их поднятие или опускание требует рассмотрения дополнительных действующих сил, лишь затемняющих понимание происходящего. Также для усиления эффекта в обе руки берутся гантели, дополнительно отодвигающие центры масс вытянутых рук от центра вращения.

В целом, мне кажется, более подробное рассмотрение этого неравномерного вращения дает много лучшее его понимание. Где уже практически не понадобились дополнительные физические характеристики.

Неравноускоренное вращение.

Вернемся теперь к рис. 72 и рассмотрим возможность неравноускоренного вращения под действием силы, постоянной как по величине, так и по направлению.

Сопоставим рис. 72 с другим рисунком того же учебника, иллюстрирующим совсем другое движение – колебания маятника рис. 242, даваемое уже в совершенно другом разделе физики. Выделяем отдельно оба эти рисунка.

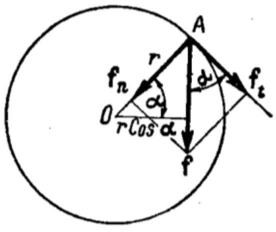


Рис. 72. Вращение точки A по окружности.

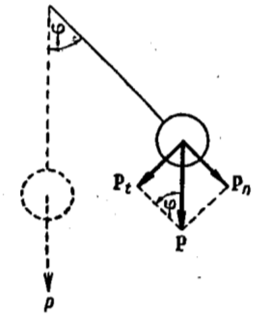


Рис. 242. Колебания маятника.

На рис. 242 показано колебания маятника под действием силы тяжести P.

Чем отличаются друг от друга сравниваемые движения? – Тем, что на рис. 72 действующая сила f имеет непостоянное направление и вращается вместе с самим вращающимся диском. А на рис. 242 это не так. Здесь действующая сила P постоянна как по величине, так и по направлению, а изменяется только ее тангенциальная составляющая P_t .

Если то же самое будет происходить на рис. 72, то оба эти движения станут просто неразличимы. Если не считать несущественные отличия в части обозначений.

Взамен силы f и ее проекций f_n и f_t, а также угла $\propto$, показанных на рис.72, на рис.242 даны другие обозначения – сила тяжести P и ее проекции P_n, P_t, а также угол $\varphi = 90^0 - \propto$. Но эти незначительные отличия совершенно не принципиальны. Здесь то же самое неравноускоренное вращение под действием тангенциальной составляющей P_t силы тяжести P.

Но есть и другое теперь уже *принципиальное* отличие. Оно касается действующих сил f_n и P_n. Как можно видеть, эти по-разному обозначаемые проекции имеют *противоположные* направления, причем никакого перемещения под действием этих проекций в обоих случаях не происходит. Для маятника рис. 242 его отсутствию дается такое словесное объяснение – силе P_n противодействует равная ей по величине и противоположная по направлению сила/реакции $F = -P_n$ связи, вследствие чего их векторная сумма в направлении радиуса маятника равна нулю. Поэтому движение в указанном направлении отсутствует, а сама эта сила F противодействия на этом рисунке не изображается. Проекция же P_t противодействующей силы не имеет, поэтому в ее направлении движение происходит.

На рис. 72 точно такая же ситуация и в направлении действия проекции силы f_n движения не происходит. Так как ему в этом тоже препятствует сила противодействия $F = -f_n$ связи, равная по величине и противоположная по направлению.

При равномерном вращении эти реально действующие силы называются одна – *центростремительной*, другая – *центробежной,* причем их величины равны, а направления противоположны, поэтому их векторная сумма постоянно равна нулю http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8713.html .

А в случае же неравномерного движения, показанное на рис. 72, как и в случае маятника на рис. 242 , движение в направлении радиуса r тоже не происходит, так как ему препятствует точно такая же реакция $F = -f_n$ связи, равная по величине и противоположная по направлению.

Итак, оба рисунка 72 и 242 фактически не полны, т.к. на них не изображены противодействующие силы реакции связи, направленные противоположно проекциям f_n и P_n. Словесно об этом говорится, но в памяти может и не зафиксироваться

Полнота и неполнота описания

Зададимся теперь таким вопросом: является ли описание движения маятника, показанного на рис. 242 полным? Очевидно, что нет, поскольку здесь нет начального положения, соответствующего одновременно значениям $f_t = 0$ и линейной скорости $V = 0$. В крайнем нижнем положении маятника $f_t = 0$, однако $V = V_{max}$, а в промежуточных положениях обе они не равны нулю, за исключением одной единственной точки – крайнем верхнем положении, для случая маятника обычно не изображаемого. Именно в ней оба эти значения равны нулю $f_t = 0$, $V = 0$, что соответствует началу движения.

Итак, в неравноускоренном вращении, показанном на рис. 72, *при условии постоянного направления* силы f, действует переменная сила f_t.

В начальном положении $\propto = 90^0$ значение $f_t = 0$, линейная скорость V_t кругового движения тоже равна нулю $V_t = 0$. Затем сила f_t постепенно возрастает по формуле $f_t = f\cos\propto$, где прилагаемая сила f является постоянной величиной, соответствующей весу P на рис. 242, и достигает максимального значения $f_t = f$ при угле $\propto = 0$. Ускорение a_t в направлении кругового движения в силу $f_t = ma_t$ тоже соответственно максимально $a_t = max$. Затем сила f_t вместе с ускорением a_t постепенно уменьшаются по той же формуле $f_t = f\cos\propto = ma_t\cos\propto$ и обращается в ноль при угле $\propto = -90^0$. При этом скорость $V_t = max$. После чего весь этот процесс повторяется в обратной последовательности.

И что здесь еще важно? – В этом неравноускоренном вращении сила f_t, линейная/ скорость V_t и линейное/ускорение a_t непрерывно изменяются, не сохраняя постоянства значений. Возможно поэтому вводимые дополнительные характеристики (кроме момента/инерции I) именуются *моментами*, имеющими определенные числовые значения лишь в *данный момент* времени, а затем изменяющиеся. Можно было бы точно так же говорить о *моментальной* силе f_t, *моментальной* скорости V_t и *моментальном* ускорении a_t, но их принято называть просто *переменными* величинами.

На рис. 242 также отсутствует момент начала неравномерного движения, когда действующая сила f_t и его линейная/скорость V равны нулю $f_t = 0$, $V = 0$. В нижнем положении маятника сила f_t равна нулю, но это не начало движения, поскольку при этом его линейная/скорость V движения максимальна $V = V_{max}$, а не равна нулю $V = 0$, чтобы соответствовать началу движения. Где же находится это начало неравномерного движения? –

В крайнем верхнем положении, противоположном крайнему нижнему, при котором действующая сила P_t тоже равна нулю $P_t = 0$.

А чтобы поместить тело маятника в это начальное положение нужно приложить силу и выполнить некоторую работу.

Такое начальное положение неустойчиво. Малейшее смещение $\pm\Delta\varphi$ приводит к началу неравноускоренного движения в ту или другую сторону. В одном случае получаем реверсивное колебательное движение, в другом – неравноускоренное круговое вращение.

Неравноускоренное вращение

Где вообще нам встречается вращение с переменным ускорением? – В начале движения, когда, например, колеса автомобиля, бывшие до того неподвижными, приходят во вращательное движение, увеличивая линейную/скорость V вращения, до максимальных значений. После чего оно превращается в равномерное с линейным/ускорением $a = 0$ и $V = const$. Или при торможении, когда происходит обратный процесс замедления вращения в предельном значении до нуля $V = 0$. В обоих случаях процесс неравномерного вращения *конечен*. Можно и непрерывными переключениями пускать его рывками вперед-назад, как это делается в автомобильных пробках.

А может ли это неравноускоренное вращение быть непрерывным?

И наконец, последний важный вопрос: может ли неравноускоренное вращение быть непрерывным? То есть самостоятельно осуществляться без всякого внешнего управления? – Ответ такой – да, может.

Вот несколько практических примеров такого вращения рис. 7 – 10 .

Рис. 7. Здесь на руках крутят «солнышко»

Рис. 8. А это качели с переворотом.

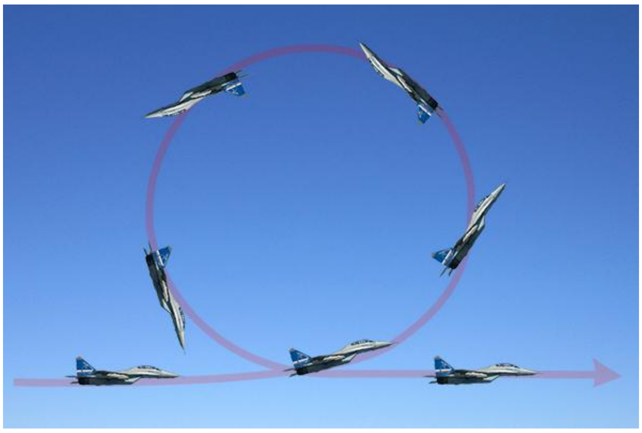


Рис. 9. На самолете («мертвая петля» Нестерова)

Рис. 10. И наконец просто бегом.

Вот запись непрерывного вращения с переменными линейной/скоростью V линейным/ ускорением a в спортивном силовом упражнении, называемом вращением «солнышка», рис. 11.

Рис. 11. Спортивное силовое упражнение «солнышко».

Его именно «крутят», т.е. это *круговое* движение. И при этом *неравноускоренное*. В верхнем положении движение замирает (линейная скорость вращения обращается в ноль), затем оно ускоряется и в нижнем положении линейная скорость вращения становится максимальной рис. 12.

Рис. 12. В верхнем положении движение замирает, затем оно ускоряется

То же самое происходит и в колебательном маятнике. За исключением того, что показанная на рис. 242 угловая амплитуда колебания маятника не достигает 180^0. В верхней точке кругового движения при угловой амплитуде $\propto_{max} = 180^0$ маятник замирает в состоянии неустойчивого равновесия. При этом линейная/скорость V кругового движения и действующая на него сила f в направлении этой линейной скорости обе равны нулю, но при незначительном угловом отклонении $\Delta\propto$ (положительном или отрицательном), маятник приходит в ускоренное движение *вперед* или *назад*. Движение назад соответствует колебанию маятника с угловой амплитудой 180^0, движение же вперед означает переход от колебательного движения к неравноускоренному круговому вращению.

И в заключение.

Неравноускоренное круговое вращение на рис. 7 - 12 полностью соответствует колебательному движению с амплитудой колебания $\propto_{max} = 180^0$ *без реверса направления* движения рис. 242. Дополнительные физические характеристики при этом не обязательны.