Сомсиков А.И.

Исправление физики. Работа и энергия

Векторный смысл работы.

Памяти родителей – Ивана Ивановича и Елизаветы Титовны, с любовью.

Введение

Классическая физика, называемая также ньютоновской, является правильной, но неполной. Поскольку она нуждается в пояснениях. Прежде всего, относящихся к появлению размерных коэффициентов.

В ней действующая сила выражается двумя формулами – второго закона Ньютона $f = ma$, где f – сила, m – масса тела, a – его ускорение и закона Всемирного тяготения $f = k\frac{m_1 m_2}{r^2}$, где m_1, m_2 – массы взаимодействующих тел 1 и 2, r – расстояние между ними, k – размерный коэффициент, обеспечивающий согласование используемых единиц силы, массы и расстояния рис. 1.

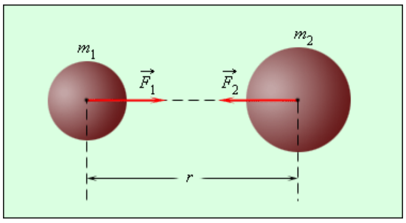

Рис. 1. Силы $F_1 = -F_2$ тяготения тел 1, 2 с массами m_1, m_2 и ускорениями $a_1, -a_2$ с противоположными знаками.

Физическое определение массы *отсутствует*, поэтому ее единица выбирается произвольно. Что и приводит к появлению размерного коэффициента k. Если же приравнять его безразмерному множителю $k = 1$, то в этом случае единица массы уже будет непроизвольной.

Такая система единиц была предложена В.Томсоном и ее можно назвать *физической*, поскольку в ней формулы имеют простейший вид. Тогда как все прочие с произвольно выбираемыми эталонами – *техническими*, использующими размерные коэффициенты с *приписываемым* им физическим смыслом.

В *физической системе единиц* масса взаимодействующих тел 1, 2 имеет кинематическое определение: $m_1 = a_2 r^2, m_2 = a_1 r^2$.

В словесной формулировке: ***масса*** m *каждого тела является произведением ускорения* a, *приобретаемого любым другим телом, помещаемым на расстоянии* r *от него, на квадрат этого расстояния* r^2 . Масса m каждого тела считается постоянной величиной.

Размерность массы m в физической системе единиц составляет $[m] = L^3 T^{-2}$.

При этом ускорение a_1 тела 1 определяется телом 2 по формуле $a_1 = \frac{m_2}{r^2}$, а ускорение a_2 тела 2 определяется телом 1 по формуле $a_2 = \frac{m_1}{r^2}$.

Отсюда следует также кинематическое определение силы: $f = a_1 a_2 r^2$ – ***сила*** f *взаимодействия тел 1, 2 является произведением ускорений* a_1, a_2 , *приобретаемых каждым телом на квадрат расстояния* r *между ними.*

Размерность силы f в физической системе единиц составляет $[f] = L^4 T^{-4}$.

Это рассмотрено в работе http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8715.html .

Закон Всемирного тяготения также нуждается в пояснении при малых расстояниях r, стремящихся к нулевому значению $r \to 0$.

Здесь постоянство значений масс m_1, m_2 при $r \to 0$ приводит к математической неопределенности $f \to \infty$, что уже физически невозможно. Возникающая неясность *обходится* заявлением, что этот закон справедлив лишь при расстояниях r, значительно превышающих собственные размеры тела (в случае Земли – 12 000 км!). А при дополнительном сближении его следует разбивать на малые части, рассчитывая тяготение для каждой из них по отдельности с последующим интегрированием полученных результатов. Ясно, что это просто уход от вопроса, нарушающего понятие всемирности закона тяготения.

В статье http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/11962.html показано, что сила взаимодействия внутри большего тела не устремляется в бесконечность, а наоборот постепенно уменьшается до нуля. То есть закон Всемирного тяготения при нулевом расстоянии $r \to 0$ не нарушается.

Работа

Физическое определение работы A таково: $A = fS$, где f – сила, действующая на тело, S – величина пройденного пути. Поскольку $f = ma$ понятие силы является излишним и можно использовать другое определение работы A, не содержащее избыточных представлений: $A = maS$.

В словесной формулировке: в неравномерном движении работа A определяется произведением массы m тела на ускорение a и величину пройденного пути S.

Размерность работы A в физической системе единиц составляет $[A] = L^5 T^{-4}$.

Физическое понимание работы A затруднено векторным смыслом силы $\vec{f}$ и пройденного пути $\vec{S}$. Или же вектора ускорения $\vec{a}$ и вектора скорости $\vec{V}$. Что может вообще означать это произведение двух векторов? Математика предлагает два варианта ответа на этот вопрос, называемых *скалярным* и *векторным* произведением векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ Рис. 2.

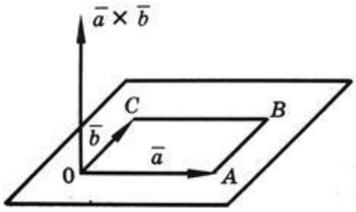

Рис. 2. Векторное произведение $\vec{a} \times \vec{b}$ векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$.

Количественно оба эти произведения одинаковы, но в скалярном произведении результат считается скаляром, в векторном – тоже вектором. И сразу же возникает вопрос, как теперь направлять этот новый вектор $\vec{a} \times \vec{b}$, являющийся векторным произведением векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$? – Решили так – ни по одному из двух направлений исходных векторов $\vec{a}$ или $\vec{b}$ и даже не в одной с ними плоскости, а перпендикулярно ей, причем еще нужно выбрать по какую именно из двух возможных ее сторон. Почему именно так, а не иначе у математиков можно уже не спрашивать. Поскольку такого ответа не существует. Зато теперь можно находить или вычислять чего-то там по установленным *правилам*. Но физиков интересует вовсе не вычисления, а физический смысл этих геометрических построений. А его-то как раз математики и затрудняются объяснить. Поэтому решили так: чтобы избежать неудобных лишних вопросов считать произведение векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ для случая работы A *скаляром* и всего делов. То есть скалярный смысл работы A является результатом *договоренности*, а не физического анализа.

Между тем векторное понимание работы $\overrightarrow{A}$ не только возможно, но и вполне естественно с учетом следующих соображений. Работа A определяется вовсе не пройденным путем S или скоростью движения V, а лишь наличием действующей силы f или ускорения a. В отсутствие которых, т.е. при $a = 0$ скорость движения V и пройденный путь S могут быть какими угодно, при этом все равно работа $A = 0$, поскольку такое движение является просто *инерционным*. Поэтому главной величиной, определяющей работу A является именно ускорение a (без ускорения a нет и работы A), причем именно направление вектора ускорения $\vec{a}$ и определяет направление вектора работы $\vec{A}$.

Поэтому произведение векторов $\vec{a}$ и $\vec{V}$ можно и нужно понимать в векторном смысле, но вовсе не в математическом понятии векторного произведения, а в физическом понимании вектора работы $\vec{A}$, направление которого определяется вектором ускорения $\vec{a}$.

Также напомним, что ускорение a_1 тела 1, по определению, создается не самим этим телом 1, а каким-либо другим телом 2 с массой m_2 , находящимся на расстоянии r от него: $a_1 = \frac{m_2}{r^2}$.

Соответственно ускорение a_2 тела 2 тоже создается не самим этим телом 2, а другим телом 1 с массой m_1 , находящимся на расстоянии r от него: $a_2 = \frac{m_1}{r^2}$.

Для лучшего понимания работы $\vec{A}$ рассмотрим несколько частных случаев неравномерных движений.

Вертикальное падение тела.

Примером неравномерного движения с постоянным ускорением $a = g = const$, где g - ускорение земного тяготения, является падение тела 1 с высоты H.

Здесь направление вектора ускорения $\vec{a}$ совпадает с направлением движения, определяемого вектором скорости $\vec{V}$.

Работа A, выполняемая силой тяготения Земли (тела 2) для $S = H$, без учета сопротивления воздуха, составляет $A = mgH$.

Начальная скорость V_0 движения равна нулю $V_0 = 0$, конечная за время t движения равна максимальному значению V_{max}, определяемому по формуле $V_{max} = gt$, откуда $t = \frac{V_{max}}{g}$.

Путь H, пройденный в равноускоренном движении составляет

$$H = V_0 t + \frac{gt^2}{2} = \frac{g}{2}(\frac{V_{max}}{g})^2 = \frac{V_{max}^2}{2g} .$$

Откуда получаем второе определение выполняемой работы A по формуле $A = mgH = mg\frac{V_{max}^2}{2g} = \frac{mV_{max}^2}{2}$, выражаемое через максимальное значение приобретаемой при этом скорости V_{max}.

Движение тела вертикально вверх.

Вернуть теперь тело из места его падения обратно на высоту H можно его вертикальным подбрасыванием с начальной скоростью $-V_{max}$.

Здесь направление вектора ускорения $\vec{a}$ противоположно направлению движения, определяемого вектором скорости $\vec{V}$. Движение является равнозамедленным от скорости $-V_{max}$ до $V = 0$ под действием тормозящего ускорения g, вызываемого тяготением.

Скорость V_t движения составляет $V_t = V_{max} - gt$.

При $V_t = 0$ время t движения составляет $t = \frac{V_{max}}{g}$.

Путь H, пройденный в равнозамедленном движении составляет

$H = V_{max}\,t - \frac{gt^2}{2} = V_{max}\frac{V_{max}}{g} - \frac{g}{2}(\frac{V_{max}}{g})^2 = \frac{(V_{max})^2}{2g}$.

Выполняемая работа $\vec{A}$ равная $\vec{A} = m\vec{g}H = \frac{m(V_{max})^2}{2}$, противодействует движению, т.е. направлена вертикально вниз.

Движение тела 1 вертикально вверх выполняется за счет наличия у него начальной скорости $V_0 = -V_{max}$, направленной вертикально вверх в равномерно замедленном движении под действием тормозящего ускорения $a = -g$ до получения конечной скорости $V = 0$.

Здесь происходит векторное суммирование двух независимых движений с противоположными направлениями – равномерного движения вертикально вверх с постоянной скоростью $-V_{max}$ и равноускоренного движения вертикально вниз под действием тяготения с постоянным ускорением g свободного падения. С начальной скоростью $V_0 = 0$.

Суммирование обоих этих движений дает $S = H = V_{max}\,t - \frac{gt^2}{2}$, $V_t = V_{max} - gt = 0$.

Откуда $t = \frac{V_{max}}{g}$ и $H = V_{max}\frac{V_{max}}{g} - \frac{g}{2}(\frac{V_{max}}{g})^2 = \frac{V_{max}^2}{2g}$.

В обоих случаях работа A на пройденном расстоянии $S = H$ определяется ускорением g, при этом направление вектора ускорения $\vec{a} = \vec{g}$ не изменяется. Поэтому и знак выполняемой работы A тоже не изменяется. То есть в данном случае работа A действительно может рассматриваться как скаляр.

Равномерное движение лифта

Другим примером вертикального перемещения вверх или вниз является равномерное движение лифта.

Оно образовано тремя этапами. При трогании за время Δt разгона лифт получает положительное ускорение $a > 0$ с изменением скорости V от нулевого $V = 0$ до заданного значения $V > 0$ и уменьшением самого ускорения от заданного значения $a > 0$ до нуля $a = 0$. Затем происходит основное движение за время t при нулевом ускорении $a = 0$ и постоянной скорости $V = const$. И наконец, при остановке движения за время торможения Δt лифт получает отрицательное ускорение $a < 0$ с изменением скорости V от заданного значения $V > 0$ до нуля $V = 0$ и изменением тормозящего ускорения от заданного значения $a < 0$ до нуля $a = 0$.

Основное движение происходит при нулевом ускорении $a = 0$ и постоянной скорости $V = const$, поэтому работа A_S за время t, определяемая выражением $A_S = ma_S S$, в таком движении равна нулю: $A_S = 0$. Как это понимать? Работа ведь фактически выполняется, притом немалая.

А каковы при этом действующие силы и соответствующие им ускорения? Их две – сила f_1, образуемая тяготением $f_1 = P = mg$, где m – масса лифта и g – ускорение свободного падения, направленная вертикально вниз, и создаваемая нами сила противодействия $f_2 = ma = -f_1 = -P = -mg$, равная по величине силе тяготения $f = P = mg$ и направленная вертикально вверх ($a = -g$).

Обе возникающие при этом силы f_1 и f_2 и их ускорения g и a равны по величине и противоположны по направлению. Соответственно и обе выполняемые ими работы A_1 и A_2 тоже равны по величине и противоположны по направлению. То есть суммируются *алгебраически*, а не арифметически. А значит, эти работы A_1 и A_2 являются *векторами*, а не скалярами, как это ошибочно считается в физике.

Поэтому суммарная выполняемая работа A действительно равна нулю. При перемещении на высоту H обе действующие силы выполняют одинаковую работу A_1, равную $A_1 = mgH$, но с противоположными знаками $A_2 = -A_1 = -mgH$. Суммарная выполняемая работа A при этом составляет: $A = A_1 + A_2 = A_1 - A_1 = 0$. Что и должно быть, поскольку $A = maH = m(g - g)H = 0$ – при *равномерном* движении ускорение $a = 0$ и соответственно работа $A = 0$.

При расчете конструкции лифта учитывается лишь одна создаваемая нами сила $f_2 =- f_1 = -P = -mg$ и соответственно выполняемая ею работа $A_2 = -A_1 = -mgH$. Как если бы существовало единственное ускорение $a =- g$. Тогда как противодействующая сила тяжести $f_1 = P = mg$, создаваемая тяготением, и соответственно выполняемая ею работа $A_1 = mgH$, равная по величине и противоположная по направлению работе $A_2 = -A_1 = -mgH$, при этом как бы не замечается.

Движение под углом к направлению силы и ускорения

Таким примером является движение тела по наклонной плоскости с углом наклона $\propto$ (Рис. 3).

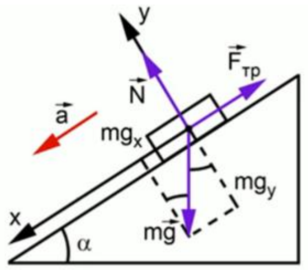

Рис.3. Движение тела по наклонной плоскости.

Здесь вектор ускорения $\vec{a}$ является проекцией вектора ускорения $\vec{g}$ на направление движения, составляющей $a = gsin \propto$, а пройденный путь $S = \frac{H}{sin \propto}$.

Поэтому выполняемая работа $A = maS = m(gsin \propto)\left(\frac{H}{sin \propto}\right) = mgH$. То же самое, что и при вертикальном падении с высоты H.

То же и при движении снизу вверх с отрицательным относительно вектора скорости $\vec{V}$ ускорением $a = -gsin \propto$, соответствующем равнозамедленному движению, $A = -mgHsin \propto$.

Зачем понадобился этот пример? – Для иллюстрации того, как его объясняют.

В Интернете много картинок, изображающих это движение. Но среди них почти нет полностью подходящего. Есть даже прямо неверные. Все они обладают одним недостатком – избыточностью информации, рассеивающей внимание и не относящейся к существу дела. Здесь важно все, любое обозначение. Если, например, рассматриваемый угол единственный, то для его обозначения должна использоваться только лишь *первая* буква $\propto$ в данном случае греческого алфавита, а не какая-либо другая, случайная – β, θ или φ. Даже необычное положение системы координат XOY относительно наклонной плоскости, к тому же еще и движущейся вместе с самим этим телом вносят определенную неясность понимания.

Любое избыточное или второстепенное обозначение может привести к непреднамеренному сбою логики рассуждения. Это невозможно, – скажет мне кто-нибудь. – Не только возможно, но неизбежно, – отвечу я.

Как в комедийной ситуации в фильме «Закон есть закон» Рис.4.

Рис. 4. Выяснение национальности.

– Так, мать итальянка, отец неизвестен. Сейчас разберемся. – Он итальянец!

– Мать итальянка, отец неизвестен, а родился на французской территории. – Это еще сложней. – И тут его осеняет догадка.– Он француз!

Такое возможно только с этим героем? – Даже и с академиком или самим Ньютоном!

Рис.3 есть именно такой случай, когда необходимо не просто не торопиться, но даже остановиться и тщательно рассмотреть ситуацию. А что здесь является несущественным, которое необходимо прежде всего убрать? – Это, конечно, координатные оси X и Y. Они здесь явно излишни и никакого значения не имеют. Притом, что само их расположение, к тому же еще в движении необычны и могут лишь вызвать неясности.

Далее, «обязательное» изображение вектора силы трения $\overrightarrow{F_{тр}}$. Это уже избыточная наблюдательность ко второстепенным деталям, рискующая упустить что-либо важное и может быть даже главное. Сила трения $-\overrightarrow{F_{тр}}$ действительно существует, а его тормозящее ускорение $-\overrightarrow{a_{тр}}$, несколько уменьшают вектор ускорения $\vec{a}$, но и не более. Во втором приближении это нужно, конечно, учитывать, но здесь оно вовсе не главное, которое нужно непременно указывать.

А что здесь является самым главным? – Прежде всего, конечно, вектор действующей силы $\vec{P}$, определяемой земным тяготением по формуле $\vec{P} = m\vec{g}$. И даже не сам этот вектор силы $\vec{P}$, а вектор его ускорения $\vec{g}$. Заменяемый *векторной* суммой двух его проекций – параллельной наклонной плоскости $\overrightarrow{g_x}$ и перпендикулярной к ней $\overrightarrow{g_y}$. На рис. 3 обе эти проекции вектора ускорения $\vec{a}$ обозначены, но не прямо, а в составе произведений mg_x , mg_y, без указания их *векторного* характера. Нас же интересует только одна из этих проекций – вектор $\overrightarrow{g_x}$, поскольку другая проекция – вектор $\overrightarrow{g_y}$ (проекция $m\overrightarrow{g_y}$ вектора силы $\vec{P}$) уравновешивается материальным противодействием наклонной плоскости $-m\overrightarrow{g_y}$ и потому в выполнении работы A участия не принимает $m\overrightarrow{g_y} - m\overrightarrow{g_y} = 0$. Значение действующего вектора ускорения $\vec{a} = \overrightarrow{g_x}$ составляет $a = gsin \propto$.

Теперь уже можно переходить к рассмотрению самой выполняемой работы A. Здесь все очень просто. Движение является прямолинейным, действующее ускорение постоянно $a = gsin \propto$, пройденный путь S составляет $S = \frac{H}{sin \propto}$, где H – высота перемещения по наклонной плоскости. Следовательно, выполняемая работа A составляет $A = maS = m(gsin \propto)\frac{H}{sin \propto} = mgH$. То есть при движении по наклонной плоскости выполняется такая же работа A, что и при простом вертикальном падении тела с высоты H. С дополнительным увеличением, вызываемым сопротивлением силы трения $\overrightarrow{F_{тр}}$.

А как теперь различать движения в противоположных направлениях – вниз и вверх по наклонной плоскости или при вертикальном движении? Качественное различие очевидно – в первом случае движение является *ускоренным* с изменением скорости V движения от нулевого $V = 0$ до максимального положительного ее значения $+V_{max}$, а во втором *замедленным* – от максимального отрицательного значения скорости $-V_{max}$, по модулю равного максимальной положительной скорости $+V_{max}$, до нуля $V = 0$. Чтобы их различить в первом случае говорят, что выполняется положительная работа $+A$, а во втором – отрицательная $-A$. Подразумевая при этом, что знак работы A определяться вектором скорости $\vec{V}$ и что сама она, таким образом, тоже является вектором. Что, однако же, тотчас опровергается заявлением, что работа A вовсе не является *вектором*, а наоборот – *скаляром*. Как понимать это внезапно возникшее противоречие и как оно разрешается?

Есть ли в определении работы $A = maS$ какое-либо упоминание о векторе скорости $\vec{V}$? Да, в виде результата выполняемой работы $A = \frac{mV_{max}^2}{2}$. А о его направлении? – Нет, поскольку в формуле максимальная скорость V_{max} стоит в квадрате, когда $(+V_{max})^2 = (-V_{max})^2$.

Знак работы A действительно существует, но определяется не вектором скорости $\vec{V}$, а вектором ускорения $\vec{a}$, то есть выполняемая работа A тоже имеет векторный смысл $\vec{A} = m\vec{a}S$.

На рис. 3 направление вектора ускорения $\vec{a}$ при движении вниз или вверх не изменяется, следовательно, и направление вектора работы $\vec{A}$ тоже не изменяется. Поэтому она в этом случае вполне правильно считается *скалярной* величиной, то есть *не зависящей от направления движения*, определяемого вектором скорости $\vec{V}$. Однако, так бывает далеко не всегда, а только лишь в случае, когда направление вектора ускорения $\vec{a}$ не изменяется.

Поэтому торопливо-поверхностное обобщение, будто работа A и вообще является скаляром является ***ошибкой***. К чему она может привести и как избегают ее последствий покажем ниже на конкретных примерах.

Свободное и связанное движения

Но и это еще не все. Теперь самое главное. В рассмотренном выше вертикальном движении вниз с начальной скоростью $V = 0$ или вверх с начальной скоростью V_{max} с постоянным ускорением $a = g$ само движение определяется только самим этим ускорением.

Такое движение называется *свободным*.

В отличие от него движение, показанное на рис. 3, является *связанным*, поскольку в нем проекция ускорения $g_y = gcos \propto$, перпендикулярная направлению движения, уравновешена материальным противодействием $-g_y$ наклонной поверхности, вследствие чего ускоренного движения по этому направлению не происходит $(g_y - g_y = 0)$ и выполняемая работа A_y равна нулю. Другими словами, ускоренное движение тела 1 определяется не всем действующим ускорением g , вызванным телом 2 (тяготением Земли), а лишь его частью $g_x = gsin \propto$, другая же часть g_y скомпенсирована противодействием наклонной плоскости создающей такое же ускорение противоположного знака $-g_y$ и потому в выполнении работы A на участвует.

Создающая противодействие в данном случае наклонная материальная поверхность называется *связью*.

Работа постоянной силы, направленной под углом к перемещению

Другой пример связанного движения показан на Рис. 5.

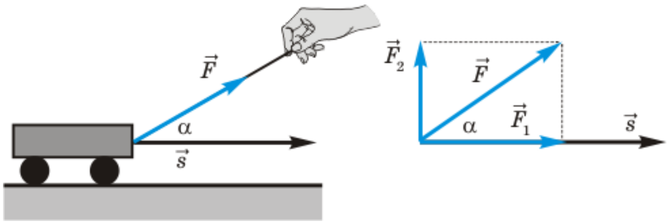

Рис. 5. Работа $A = F_1 S = (F\cos\propto)S$.

Здесь тоже вектор силы $\vec{F}$ расположен под углом $\propto$ к направлению движения $\vec{S}$.

Работа A определяется проекцией вектора силы $\overrightarrow{F_1} = \vec{F}\cos\propto = m\vec{a}\cos\propto$ и вектора ускорения $\overrightarrow{a_1} = \vec{a}\cos\propto$ на направление движения $\vec{S}$, определяемое вектором скорости $\vec{V}$. Такое движение тоже является *связанным*, поскольку в нем вторая проекция вектора силы $\overrightarrow{F_2} = \vec{F}\sin\propto = m\vec{a}\sin\propto$ и вектора ускорения $\overrightarrow{a_2} = \vec{a}\sin\propto$, перпендикулярные направлению движения $\vec{S}$, не вызывает ускоренного движения, лишь уменьшая силу тяготения $\vec{P}$ вследствие вычитания $\overrightarrow{P_1} = \vec{P} - \overrightarrow{F_2} = \vec{P} - m\overrightarrow{a_2}$.

Поскольку сила $\vec{F} = m\vec{a}$, это означает, что в данном случае выполняется проецирование вектора ускорения $\vec{a}$ на вектор скорости $\vec{V}$, задающий вектор движения $\vec{S}$. Причем работа A учитывает не все ускорение $\vec{a}$, а лишь одну из его проекций $\overrightarrow{a_1} = \vec{a}\cos\propto$ на вектор скорости $\vec{V}$ движения. Тогда как другая его проекция $\overrightarrow{a_2} = \vec{a}\sin\propto$ – перпендикулярная вектору скорости $\vec{V}$ в работе A участия не принимает и потому не учитывается.

Данный пример хотя и правилен, но для рассмотрения неудачен, т.к. может привести к *ошибочному обобщению*, будто бы и всегда все обстоит именно так.

Направления. Что на что проецируется

В свободном криволинейном движении векторы скорости $\vec{V}$, определяющий направление движения, и ускорения $\vec{a}$, определяющий вектор работы $\vec{A}$, общем случае расположены под углом друг к другу (рис.6).

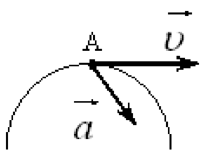

Рис. 6. Криволинейное движение с направлением векторов скорости $\vec{V}$ и ускорения $\vec{a}$ под углом друг к другу.

Как здесь определяется работа A? Поскольку вектор работы $\vec{A} = m\vec{a}S$ определяется вектором ускорения $\vec{a}$, правильным является проецирование вектора скорости $\vec{V}$ на вектор ускорения $\vec{a}$. Другая проекция вектора скорости $\vec{V}$, перпендикулярная вектору ускорения $\vec{a}$, не учитывается, т.к. она на выполняемую работу $\vec{A}$ не влияет и движение по этому направлению сохраняется равномерным, инерционным.

Пример ***неправильного*** проецирования вектора ускорения $\vec{a}$ на вектор скорости $\vec{V}$ определяющий направление движения в свободном криволинейном движении (Рис.7).

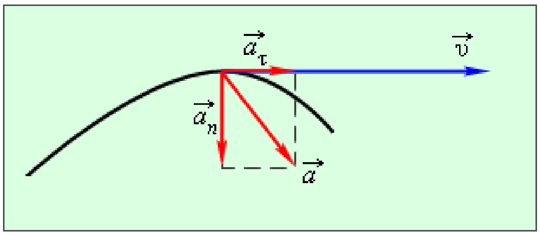

Рис.7. ***Неправильное*** проецирование вектора ускорения $\vec{a}$ на вектор скорости $\vec{V}$ определяющий направление движения, в свободном криволинейном движении.

Здесь $\overrightarrow{a_\tau}$ – проекция вектора ускорения $\vec{a}$ на направление движения, определяемое вектором скорости $\vec{V}$ («тангенциальная» составляющая), $\overrightarrow{a_n}$ – проекция вектора ускорения $\vec{a}$ на перпендикуляр к направлению движения, определяемому вектором скорости $\vec{V}$ («нормальная» составляющая). Другими словами, есть вектор ускорения $\overrightarrow{a_n}$, однако, в этом направлении никакого ускоренного движения и выполняемой при этом работы A_n якобы не происходит.

На рис. 8 тоже ***неправильно***.

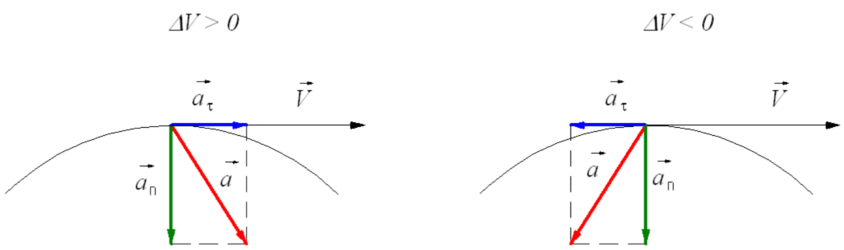

Рис.8. Другой пример ***неправильного*** проецирования вектора ускорения $\vec{a}$ на направление движения, определяемое вектором скорости $\vec{V}$.

А здесь пример ***правильного*** проецирования вектора скорости $\vec{V}$ на вектор ускорения $\vec{a} = \vec{g}$, образуемый земным тяготением в свободном криволинейном так называемом «баллистическом» движении (рис.9).

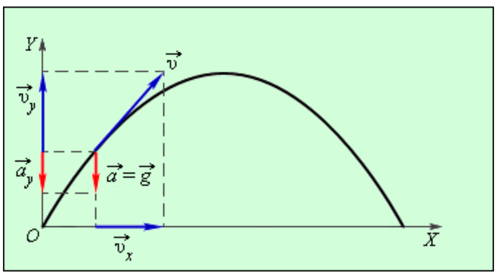

Рис.9. ***Правильное*** проецирование вектора скорости $\vec{V}$ на вектор ускорения $\vec{a} = \vec{g}$, образуемый земным тяготением в свободном криволинейном движении.

Вектор скорости $\vec{V}$ образован векторными проекциями $\vec{V_x}$, $\vec{V_y}$ – на вектор ускорения $\vec{a} = \vec{g}$ и перпендикулярно ему. Причем только одна векторная проекция скорости $\vec{V_y}$ участвует в выполнении работы $\vec{A}$, другая же составляющая $\vec{V_x}$, перпендикулярная вектору ускорения $\vec{a} = \vec{g}$ в выполнении работы $\vec{A}$ участия не принимает и ее значение сохраняется постоянным, а движение по этому направлению – равномерным, инерционным.

Поскольку приведенные примеры – правильного и неправильного проецирования в свободном криволинейном движении даются в одних и тех же учебниках физики, правильное проецирование, по-видимому, является не вполне осознанным и в известной мере случайным.

То же можно сказать и о векторном смысле самой работы $\vec{A}$. Она считается скаляром, хотя и принимающим положительное или отрицательное значения относительно вектора скорости $\vec{V}$ движения, подразумевающие ее явный векторный смысл. Но это понимание тоже ***неверное***, поскольку вектор работы $\vec{A}$ определяется не вектором скорости $\vec{V}$ движения, а вектором ускорения $\vec{a}$, в соответствии с определением работы $\vec{A} = \vec{F}S = m\vec{a}S$ в неравномерном движении.

На рис.9 вектор ускорения $\vec{a}$ не изменяет своего направления, поэтому и вектор работы $\vec{A}$ при движении вверх и вниз тоже не изменяет направления, т.е. приписываемого ему знака.

Работа с непостоянным ускорением

Если вектор ускорения $\vec{a}$ в свободном движении или его проекция $\vec{a}_\tau$ на направление движения, определяемое вектором скорости $\vec{V}$ в связанном движении, непостоянны по величине и/или направлению, используется понятие *элементарной работы* $\overrightarrow{\Delta A_S}$, на малом отрезке ΔS перемещения, составляющей $\overrightarrow{\Delta A_S} = m\vec{a}\,\Delta S$ – в свободном движении или $\overrightarrow{\Delta A_S} = m\vec{a}_\tau\,\Delta S$ – в связанном движении, пределах которого вектор ускорения $\vec{a}$ или его проекция $\vec{a}_\tau$ на вектор скорости $\vec{V}$ движения с заданной точностью измерений может считаться постоянной величиной $\vec{a} = const$ или $\vec{a}_\tau = const$.

При этом полная работа A_S на отрезке S определяется суммой элементарных работ ΔA_S, выражаемой интегрированием: $A_S = \int_0^S madS$ или $A_S = \int_0^S ma_\tau dS$.

Это первое кинематическое определение полной работы A_S.

С учетом $a = \frac{dV}{dt}$ или $a_\tau = \frac{dV}{dt}$ в свободном или связанном движении, получим второе кинематическое определение полной работы A_S :

$$A_S = \int_{V_0}^{V_S} mV_S dV = \frac{m(V_S^2 - V_0^2)}{2}.$$

Работа A_1 над телом 1 выполняется телом 2, создающим ускорение a_1, а не самим этим телом 1. И наоборот, работа A_2 над телом 2 выполняется телом 1, создающим ускорение a_2 . Как соотносятся между собой эти работы? – Они имеют противоположные знаки в соответствии со знаками определяющих их ударений a_2 , $-a_1$ и соответствующих им перемещений S_2, $-S_1$. А соотношения их величин A_1 , A_2 определяются отношениями масс m_1, m_2 .

Действительно:

$A_1 = \int_0^{S_1} m_1 a_1\, dS_1$, причем в ускоренном движении $S_1 \sim a_1$, а значит $A_1 \sim a_1^2$,

$A_2 = \int_0^{S_2} m_2 a_2\, dS_2$, причем $S_2 \sim a_2$ и $A_2 \sim a_2^2$. Откуда $\frac{A_1}{A_2} = (\frac{a_1}{a_2})^2$.

По третьему закону Ньютона $f = m_1 a_1 = m_2 a_2$, откуда $\frac{a_2}{a_1} = \frac{m_1}{m_2}$.

Отношение работ A_1 , A_2, выполняемых телами 2 и 1, обратно пропорционально квадрату отношения их масс m_1 и m_2:

$$\frac{A_1}{A_2} = (\frac{m_2}{m_1})^2.$$

Если $m_2 \gg m_1$ (практически $m_2 \to \infty$), например, масса Земли по отношению в массе тела m_1 , сопоставимого с массой человека, а расстояние r между телами 1, 2 достаточно велико (для Земли $r > 6000$ км), то $a_1 = \frac{m_2}{r^2}$ и $a_2 = \frac{m_1}{r^2}$, где a_2 практически равно нулю $a_2 = 0$. И соответственно $f_2 = m_2 a_2$ тоже равно нулю $f_2 = 0$.

В этом случае третий закон Ньютона $f_1 = -f_2$, где $f_1 = m_1 a_1$, $f_2 = m_2 a_2$ более не выполняется, поскольку $f_1 \neq 0$, а $f_2 = 0$.

Также и $A_1 = \int_0^{S_1} m_1 a_1 \, dS_1 \neq 0$, а $-A_2 = -\int_0^{S_2} m_2 a_2 \, dS_2 = 0$.

То есть выполняется только работа A_1 над телом 1 одного тела 2, при этом работа $-A_2$ тела 1 над телом 2 не выполняется.

Этот случай нарушения третьего закона Ньютона и выполнения только одной работы A_1 называется использованием *пробного* тела 1, не нарушающего состояние тела 2.

Упругие колебания

Другим примером связанного движения являются упругие колебания материальной точки с массой m относительно положения равновесия.

Упругим называется смещение $\pm x$ относительно положения равновесия $x = 0$, вызывающее силу $\mp f_x$ противодействия или ускорение $\mp a_x$, направленные противоположно смещению и пропорциональные его величине:

$$\pm x = \mp k f_x = \mp k m a_x ,$$

где k - коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом упругости, с размерностью $[k] = L^{-3} T^4$ в *физической системе* единиц.

А кто при этом создает саму эту силу?

Ответ очевиден: – пружина при растяжении или сжатии $\pm x$ создающая противодействующую силу $\mp f_x$ упругости.

А в случае математического маятника – проекция силы тяжести P на перпендикуляр к связи.

Направление вектора ускорения $\overrightarrow{a_x}$ противоположно вектору смещения $\vec{x}$ относительно нулевого положения $x = 0$. Смещению $+x$ соответствует ускорение $-a_x$, смещению $-x$ – ускорение $+a_x$.

Упругое смещение x в декартовой системе координат XOY относительно положения равновесия, соответствующего $x = 0$, может быть представлено смещением проекции равномерно вращающейся точки с радиусом-вектором $\vec{R}$ на координатную ось OX рис. 10.

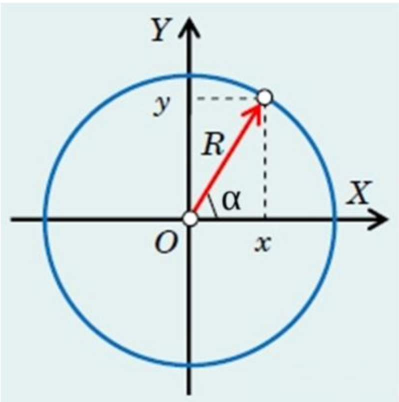

Рис. 10. Упругое смещение x по оси OX как смещение проекции равномерно вращающейся точки с радиусом-вектором $\vec{R}$.

Смещение $\pm x$ этой проекции по оси OX определяется выражением $\pm x = R\ cos \propto$.

При равномерном вращении радиуса-вектора $\vec{R}$ угол $\propto$ поворота равен $\propto = \omega t$, где ω – угловая скорость, t – время вращения,

Угловая скорость $\omega = \frac{V}{R}$, где V – линейная скорость вращения точки, R – радиус вращения .

Откуда: $\pm x = R\ cos\ \omega t$.

Скорость $V_x = \frac{dx}{dt}$ движения проекции точки по координатной оси OX составляет $V_x = \mp R\omega\ sin\ \omega t$, а ускорение $a_x = \frac{dV_x}{dt} = \mp R\omega^2 cos\ \omega t = \mp\omega^2 x$.

Это соответствует условию упругого перемещения $a_x = -kx$, где $k = \omega^2$.

Заметим, однако, что проецирование радиуса-вектора $\vec{R}$ на координатные оси OX , OY *не полностью соответствует* упругому перемещению точки по оси OX.

Количественно это действительно так, а что в части знаков? Рассмотрим, например, движение в первой четверти, т.е. в диапазоне изменения x от $x = R$ до $x = 0$.

Здесь смещение $x = R\ cos\ \omega t$ имеет знак «плюс», т.е. $+x$, скорость $V_x = -R\omega\ sin\ \omega t$ имеет знак «минус», т.е. $-V_x$, тогда как координата y, определяющая значение V_x, как видно на рис. 10, ***положительна***, т.е. не соответствует вычислению. При этом знак ускорения $a_x = -\omega^2 x$ отрицательный, т.е. $-a_x$, что вполне правильно, поскольку ускорение a_x направлено противоположно координатной оси OX.

А как теперь вычисляется работа A_x при перемещении от $x = R$ до $x = 0$? – По формуле:

$$A_x = -\int_R^0 m\,\omega^2 x dx = -m\omega^2\left(-\frac{R^2}{2}\right) = +m\frac{(\omega R)^2}{2} = +\frac{mV^2}{2}.$$

Здесь положительный знак выполняемой работы *ошибочен*, поскольку она определяется направлением ускорения $-a_x$, т.е. противоположна координатной оси OX.

Понятно теперь, почему знаки работы вообще не рассматривают и почему она считается скаляром, а не вектором?

Рассмотрим далее работу A_x, выполняемую при перемещении из положения $x = 0$ в положение $x_{max} = +R$, т.е. при изменении ωt от $\omega t = \frac{3}{2}\pi$ до $\omega t = 2\pi$ или в четвертой четверти.

Здесь смещение $x = R\ cos\ \omega t$ тоже имеет знак «плюс», т.е. $+x$, скорость $V_x = -R\omega\ sin\ \omega t$ имеет знак «минус», т.е. $-V_x$, что на рис. 10 является вполне правильным поскольку координата y, определяющая значение V_x, *отрицательна*, но при этом неверно *физически*. Поскольку реальное направление скорости V_x теперь уже совпадает с направлением координатной оси OX, т.е. скорость V_x является в данном случае положительной $+V_x$.

А вычисляемый знак ускорения $a_x = -\omega^2 x$ сохраняется отрицательным, т.е. $-a_x$, что вполне правильно, поскольку ускорение a_x по-прежнему направлено противоположно координатной оси OX.

Работа A_x перемещения от $x = 0$ до $x = R$, вычисляемая по формуле:

$$A_x = -\int_0^R m\,\omega^2 x dx = -m\omega^2\frac{R^2}{2} = -m\frac{(\omega R)^2}{2} = -\frac{mV^2}{2},$$

теперь *отрицательна*, что тоже вполне правильно, поскольку ее знак определяется знаком ускорения $-a_x$, направленным противоположно координатной оси OX .

Другими словами, в первом случае знак работы вычисляется *неправильно*, а во втором – правильно, тогда как в обоих случаях ее знак сохраняется одним и тем же. Поэтому полная работа A_x, выполняемая при упругом перемещении материальной точки из положения $x = 0$ в положение $x = R$ и обратно в положение $x = 0$ составляет:

$$A_x = -m(\omega R)^2 = -mV^2.$$

Знакомая формула, называемая также «формулой Эйнштейна», не так ли?

И точно такое же рассмотрение во второй и третьей четверти дает суммарную выполняемую работу $A_x = +m(\omega R)^2 = +mV^2$ поскольку знак выполняемой работы, определяемый направлением вектора ускорения $+a_x$ теперь уже совпадает с направлением координатной оси OX .

Чему при этом равна работа за весь полный цикл упругого смещения от $x = 0$ до $x = R$ и обратно до $x = 0$ и далее от $x = 0$ до $x = -R$ и обратно до $x = 0$?

Ответ очевиден: $A_x = -m(\omega R)^2 + m(\omega R)^2 = -mV^2 + mV^2 = 0$.

Что и должно быть, поскольку упругие колебания являются *внутренними* и происходят без выполнения дополнительной работы *извне*.

А что должно было бы быть, если бы работа A_x была действительно скаляром, как это считается в современной физике, а не вектором? Тогда выполняемая работа за каждый полный цикл колебания составила бы $A_x = 2m(\omega R)^2 = 2mV^2$, причем непрерывно возрастала бы как $A_x = 2nm(\omega R)^2 = 2nmV^2$, где n - число полных циклов.

Что, очевидно, физически невозможно, поскольку упругие колебания считаются *незатухающими* без выполнения дополнительной работы извне. Поэтому векторный смысл физического понятия работы A является ***доказанным***.

В принципе точно так же выглядят «псевдоупругие» колебания математического маятника с поочередным выполнением положительной и отрицательной работы при сохранении равенства ее нулю за полный цикл колебания.

Равномерное вращение по окружности

Рассмотрим теперь равномерное вращение по окружности с радиусом-вектором $\vec{R}$ материальной точки с массой m относительно центра O вращения. Оно показано на том же рис.10 и может выражаться линейными возвратно–поступательными смещениями его проекций x, y на координатные оси OX, OY:

$$x = R\cos \propto = R\cos \omega t\ ,$$
$$y = R\sin \propto = R\sin \omega t\ ,$$

с разностью фаз движений x, y составляющей $\frac{\pi}{2}$, поскольку $\cos \omega t = \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$.

Скорости $V_x,\ V_y$ и ускорения a_x, a_y этих линейных движений по координатным осям $OX,\ OY$ составляют:

$$V_x = -R\omega \sin \omega t,\quad V_y = R\omega \cos \omega t,$$
$$a_x = -R\omega^2 \cos \omega t = -\ \omega^2 x\ ,\quad a_y = -R\omega^2 \sin \omega t = -\ \omega^2 y\ .$$

Оба ускорения $a_x = -\omega^2 x$, $a_y = -\omega^2 y$ соответствуют упругим колебаниям проекций x, y относительно нулевого положения O.

При этом достаточно рассмотреть линейные колебания проекции x по оси OX , поскольку колебания проекции y по оси OY отличаются от них лишь разностью фаз $\frac{\pi}{2}$.

В крайних положениях $x = \pm R$ или $y = \pm R$ работа A_x или A_y составляет $A_x = \mp m\frac{(\omega R)^2}{2} = \mp\frac{mV^2}{2}$ или $A_y = \mp m\frac{(\omega R)^2}{2} = \mp m\frac{V^2}{2}$.

А в промежуточном положении $0 < x < R$ работа A_x, выражаемая через текущее значение x на координатной оси OX, составляет:

$$A_x = -m\omega^2\frac{x^2}{2} = -m(\frac{V}{R})^2\frac{x^2}{2} = -m\frac{V^2}{2}(\frac{x}{R})^2,$$

На второй координатной оси OY работа A_y, выражаемая через промежуточное значение $0 < y < R$ в диапазоне изменения y от $y = 0$ до $y = R$, составляет:

$$A_y = -m\omega^2\frac{y^2}{2} = -m(\frac{V}{R})^2\frac{y^2}{2} = -m\frac{V^2}{2}(\frac{y}{R})^2\ .$$

Поскольку обе работы являются векторами $\overrightarrow{A_x}$, $\overrightarrow{A_y}$, их векторная сумма равна работе $\overrightarrow{A_R}$ по радиусу-вектору $\vec{R}$: $\overrightarrow{A_R} = \overrightarrow{A_x} + \overrightarrow{A_y}$.

Геометрически по теореме Пифагора:

$$A_R^2 = A_x^2 + A_y^2 = \{-m\frac{V^2}{2}(\frac{x}{R})^2\}^2 + \{-m\frac{V^2}{2}(\frac{y}{R})^2\}^2 = (\frac{mV^2}{2R^2})^2(x^2+y^2)^2 = (\frac{mV^2}{2})^2,$$

Откуда $A_R = \frac{mV^2}{2}$, – работа A_R по радиусу-вектору $\vec{R}$ при угловых его поворотах $\propto$ остается постоянной величиной. Равной работе по упругому смещению материальной точки по оси OX из положения $x = 0$ в положение $x = \pm R$ или по оси OY из положения $y = 0$ в положение $y = \pm R$.

Что и должно быть, поскольку равномерное движение материальной точки с линейной скоростью V по окружности с радиусом R является инерционным, не сопровождаемым выполнением работы http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8444.html .

Энергия

В отличие от работы A, имеющей явное физическое определение, понятие энергии E такого определения не имеет, вследствие чего ее понимание расплывчато и туманно. Она измеряется выполняемой работой A до или после ее выполнения. При этом, однако, чем-то от нее отличается.

Энергию E обычно называют *способностью* выполнения работы A. В чем заключается эта способность? – В наличии ускорения a в свободном движении или его проекции a_τ на отрезке S в связанном движении.

В соответствии с двумя кинематическими определениями *одна и та же* выполняемая при этом работа A_S имеет две разные формы записи.

Первая определяется по формуле: $A_S = m\int_0^S a\,dS$ или $A_S = \int_0^S ma_\tau dS$.

Вторая – по формуле $A_S = m\int_{V_1}^{V_2} V\,dV = m\frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$.

Первой форме записи выполняемой работы A_S соответствует приобретаемая или утрачиваемая при этом *потенциальная* энергия $E_п$, выражаемая через ускорение a или a_τ и изменение положения на отрезке S.

Вторая форма записи той же самой выполняемой работы A_S выражается через изменение скорости V или ее проекции на ускорение a на том же отрезке S.

Второй форме записи выполняемой работы A_S соответствует приобретаемая или утрачиваемая при этом *кинетическая* энергия $E_к$.

При этом изменению кинетической энергия одного знака, соответствует изменение потенциальной энергии такой же величины с противоположным знаком.

Что и называется переходом энергии из одной формы в другую, из $E_к$ в $E_п$ и обратно.

Зачем понадобилось это по существу простое переименование выполняемой работы, задаваемой двумя формами записи, в эти два различно обозначаемых вида энергии? Которые переходят «из одной формы в другую». Для чего даже придуман особый закон физики, именуемый «законом сохранения и превращения энергии».

Весь секрет в том, что выполняемая работа изначально ошибочно считается скаляром, а не вектором и из этой ошибки необходимо каким-то образом выходить. «Двигая» дальше физику как науку. Но это «решается» не устранением изначально вносимой ошибки, а дополнительным ее усложнением с потерей ясности изложения.

Наращивание таких усложнений и приводит в конечном счете к невозможности единого физического описания различных ее частей. Которое ищут, но не могут найти до исправления внесенных в нее ошибок.

Но и это еще не все. В дополнение к кинематическим представлениям то же самое описывается в новых понятиях – «гравитационного поля» и его характеристик. Требующих согласования разных способов описания. В итоге физика приходит к необходимости создания еще одной дополнительной теории, объединяющей две предыдущие. Вместо сокращения и упрощения уже имеющихся.

Гравитационное поле, напряженность поля

Гравитационным полем называется область пространства, окружающая тело 1 с массой m_1, в пределах которой возникает ускорение a_2, приобретаемое любым другим телом 2 с произвольной массой m_2, в физической системе единиц определяемое по формуле $a_2 = \frac{m_1}{r^2}$.

Это *ускорение* a_2 также называется *напряженностью* E поля ($a_2 = E$), определяемом как отношение силы f, действующей на тело 2 к массе m_2 этого тела: $E = \frac{f}{m_2} = \frac{\frac{m_1 m_2}{r^2}}{m_2} = \frac{m_1}{r^2} = a_2$.

Из формулы видно, что ускорение a_2 не зависит от самого тела 2 и определяется только лишь массой m_1 тела 1 и расстоянием r до него. Другими словами, ускорение a_2 сохраняет то же самое значение даже в отсутствие самого тела 2 , когда его $m_2 = 0$.

В последнем случае само существование a_2 еще не проявлено, т.е. является виртуальным.

Реальным оно становится при помещении в данную точку пространства материального тела 2 с произвольной массой $m_2 > 0$. А как это можно сделать? – Переместив его из положения $a_2 = 0$ в заданное положение, определяемое расстоянием r.

На рис. 11 показан график изменения напряженности E поля, создаваемого телом 1, равного ускорению a_2, приобретаемому телом 2, по формуле $E = a_2 = \frac{m_1}{r^2}$.

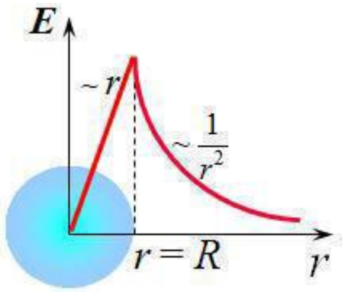

Рис. 11. Зависимость напряженности поля E или ускорения a_2 от расстояния r.

Из графика видно, что ускорение $a_2 = E$ принимает нулевое значение в двух крайних случаях: при расстоянии $r = 0$ (http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/11962.html) и при удалении «на бесконечность» $r = \infty$, т.е. на достаточно большое расстояние r, при котором ускорение a_2 с заданной точностью измерений может считаться равным нулю $a_2 \approx 0$.

Для получения $r = 0$, соответствующего установке тела 2 в центре тела 1, необходимо преодоление непроницаемости материальных тел. Это может быть достигнуто двумя путями – выполнением тела 1 в форме плоского диска с диаметром D_1 много большим его толщины h_1 ($D_1 \gg h_1$) или в виде шара диаметром D_1 с доходящим до его центра отверстием диаметром $d_1 \ll D_1$, при этом большим диаметра D_2 тела 2 ($d_1 > D_2$).

Для установки тела 2 в положение с заданным расстоянием $0 < r < \infty$ необходимо выполнение некоторой работы A.

При перемещении тела 2 относительно тела 1 из положения $r = 0$ в заданное положение $0 < r < \infty$ тело 1 выполняет противодействующую этому перемещению работу A, составляющую: $A = \int_0^r m_2 (a_2)_r \, dr$, где m_2 – масса тела 2. Приобретая при этом потенциальную энергию $E_{1п}$ за счет выполняемой нами работы $-A$, равной по величине и противоположной по направлению работе A .

При обратном свободном перемещении тела 2 относительно тела 1 из заданного положения $0 < r < \infty$ в положение $r = 0$ тело 1 выполняет ту же работу A, составляющую $A = \int_0^r m_2 (a_2)_r \, dr$, совпадающую с направлением перемещения, при уменьшении величины его потенциальной энергии от значения $(E_{1п})_r$ до нуля $(E_{1п})_{r=0} = 0$. При этом потенциальная энергия тела 1 переходит в кинетическую энергию $(E_{2к})_{r=0} = (E_{1п})_r$ тела 2.

При свободном перемещении тела 2 относительно тела 1 из положения $r = \infty$ в положение $0 < r < \infty$ тело 1 выполняет работу $A^{'} = \int_\infty^r m_2 (a_2)_r \, dr$, совпадающую с направлением перемещения. При этом потенциальная энергия $(E_{1п})_{r=\infty}$ тела 1 уменьшается на величину $(E_{1п})_{r=\infty} - (E_{1п})_r$, переходя в кинетическую энергию $E_{2к}$ тела 2, равную выполненной работе $A^{'}$.

При дальнейшем перемещении тела 2 относительно тела 1 из положения $0 < r < \infty$ в положение $r = 0$ тело 1 выполняет дополнительную работу A, составляющую $A = \int_0^r m_2 (a_2)_r \, dr$, совпадающую с направлением перемещения, при уменьшении его потенциальной энергии от значения $(E_{1п})_r$ до нуля $(E_{1п})_{r=0} = 0$.

Потенциальная энергия тела 1 целиком переходит в дополнительную кинетическую энергию $(E_{2к})_{r=0} = (E_{1п})_r$ тела 2.

Суммарная кинетическая энергия $E_{2к}$ тела 2, перемещаемого относительно тела 1 из положения $r = \infty$ в положение $r = 0$ равна потенциальной энергии $E_{1п}$ тела 1, приобретаемой при перемещении тела 2 из положения $r = 0$ в положение $r = \infty$.

Развитие полевых представлений. Потенциал и разность потенциалов

Потенциальная энергия, приходящаяся на единицу массы тела 2 составляет $\frac{E_{r1}}{m_2} = -\frac{A_{r1}}{m_2} = -\int_0^{r_1} a_{2r_1} dr$, называется *потенциалом* гравитационного поля, создаваемого телом 1, в положении r_1 тела 2.

Разность $\int_0^{r_1} a_{2r_1} dr - \int_0^{r_2} a_{2r_2} dr$, при изменении расстояний r_1, r_2 до тела 1 с массой m_1, называется *разностью потенциалов* гравитационного поля, создаваемого телом 1, или его *напряжением*.

Напряжение не зависит от положения относительно тела 1 с массой m_1 или траектории перемещения тела 2 из положения r_1 в положение r_2 и определяется только самими этими расстояниями r_1 и r_2.

Сопротивление R внешней среды перемещению тела с массой m из положения r_1 в положение r_2, определяется противодействующим ускорением $-a_{ср}$.

А для чего все это понадобилось?

Понятие гравитационного поля по существу ведь является тем же самым описанием закона Всемирного тяготения, но лишь обозначенным другими словами. Сами по себе они ничего нового не добавляют, создавая, однако, видимость объяснения или какой-то дополнительной информации.

Вместе с производными характеристиками, вообще говоря, тоже избыточными.

Однако, здесь проявляется новый «глубокий» смысл. Поскольку в отличие от работы и потенциальной энергии, равно как и кинетической, и даже потенциала поля, считающихся *скалярами*, разность потенциалов или *напряжение* теперь уже вполне правильно считается *вектором*, но не простым, а «комплексным», располагаемым тоже на особой «комплексной» плоскости. Одна из координатных осей которой является теперь уже «действительной», а другая – «мнимой» и сам этот комплексный вектор образован «действительной» и «мнимой» проекциями рис. 12.

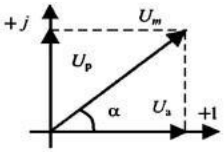

Рис. 12. Разность потенциалов или напряжение *U* как вектор на «комплексной плоскости».

Спрашивать, что означает *физически* этот словесный мусор у математиков бесполезно, поскольку они этого сами не понимают. Поэтому его приходится дополнительно расшифровывать http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8514.html , объясняя теперь уже самим математикам смысл их собственных действий.

Но этим все-таки исправляется, вернее, просто обходится исходная ошибка придания работе или энергии скалярного смысла взамен правильного векторного. После чего можно уже безошибочно двигаться дальше.

Но можно все это вовсе и не вводить при изначальном принятии векторного смысла работы или энергии, чем упрощается описание и сближаются искусственно разделяемые разделы физики.

Сейчас безуспешно пытаются придумать теорию «великого объединения» различных ее частей. Однако для этого нужно сначала устранить причины, вызывающие само их исходное разъединение.