

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНЕРЦИИ ПРОТИВ СОПРОТИВЛЕНИЙ.

Х.С. САМАНДАРОВ

Инерция – наглядно проявляемое свойство материи – широко применяется в различных механизмах. Под инерцией или инертностью можно понять стремление тела сохранить свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Мери инертности тела указывает его масса. Также инертность связано с длительностью существования материального тела. Инертность и сохранение собственной интенсивности течением времени материального тела это два названия одного и того же процесса. Исследовать инерцию с этой точки зрения дала бы возможность более эффективного применения инертности. Однако, существующая трактовка некоторых понятий механики препятствует осознать и правильно излагать многие явные противоречия. Приведем отрывок из книги Ландау-Лившиц “Теоретическая физика” т.1 стр 16

...
вида этой зависимости воспользуемся принципом относительности Галилея. Если инерциальная система отсчета K движется относительно инерциальной системы отсчета K' с бесконечно малой скоростью $\mathbf{v}$, то $\mathbf{v}' = \mathbf{v} + \mathbf{v}$. Так как уравнения движения во всех системах отсчета должны иметь один и тот же вид, то функция Лагранжа $L(v^2)$ должна при таком преобразовании перейти в функцию L' , которая если и отличается от $L(v^2)$, то лишь на полную производную от функции координат и времени (см. конец § 2).

Имеем:

$$L' = L(v'^2) = L(v^2 + 2\mathbf{v}\mathbf{v} + v^2).$$

Разлагая это выражение в ряд по степеням $\mathbf{v}$ и пренебрегая бесконечно малыми высших порядков, получим:

$$L(v'^2) = L(v^2) + \frac{\partial L}{\partial v^2} 2\mathbf{v}\mathbf{v}.$$

Второй член правой части этого равенства будет полной производной по времени только в том случае, если он зависит от скорости $\mathbf{v}$ линейно. Поэтому $\frac{\partial L}{\partial v^2}$ от скорости не зависит, т. е. функция Лагранжа в рассматриваемом случае прямо пропорциональна квадрату скорости:

$$L = \frac{m}{2} v^2, \quad (4,1)$$

где m — постоянная.

Из того, что функция Лагранжа такого вида удовлетворяет принципу относительности Галилея в случае бесконечно малого преобразования скорости, непосредственно следует, что она удовлетворяет этому принципу и в случае конечной скорости $\mathbf{V}$ системы отсчета K относительно K' . Действительно,

$$L' = \frac{m}{2} v'^2 = \frac{m}{2} (\mathbf{v} + \mathbf{V})^2 = \frac{m}{2} v^2 + 2 \frac{m}{2} \mathbf{v}\mathbf{V} + \frac{m}{2} V^2$$

или

$$L' = L + \frac{d}{dt} \left(2 \frac{m}{2} \mathbf{r}\mathbf{V} + \frac{m}{2} V^2 t \right).$$

Второй член является полной производной и может быть опущен.

Здесь, как написано, опускается из рассмотрения самый решающий член уравнения, указывающий относительность изменения кинетической энергии. Приведем также, отрывок из другой книги, относящейся к теме относительного изменения кинетической энергии. С.Э.Хайкин “Физические основы механики”. (стр.235).

Если на материальные точки системы действуют внешние силы (т. е. система не является замкнутой), то ее полная энергия ни в одной из систем координат не остается постоянной. Но при этом и разность $E' - E$ уже не остается постоянной, так как общий импульс системы (который входит в эту разность) для незамкнутой системы изменяется. Следовательно, не только полная энергия системы, но и изменения этой энергии для различных систем координат оказываются различными. При этом изменение полной энергии системы в каждой из систем координат равно работе внешних сил; но перемещения материальных точек, а следовательно, и работа внешних сил в разных системах координат также оказываются различными.

Поясним это на следующем простом примере. Пусть на тело массы m начинает действовать постоянная внешняя сила F . Будем рассматривать это движение в двух системах координат, из которых вторая движется относительно первой в направлении, противоположном F , с постоянной скоростью $-v_0$. Ускорение тела в обеих системах координат будет одно и то же: $a = F/m$. Если в начальный момент скорость тела равна нулю в системе K , то в момент времени t она будет равна $v = (F/m)t$. В движущейся системе K' , как следует из (9.2), в этот момент скорость будет равна

$$v' = v_0 + \frac{F}{m} t.$$

Соответственно кинетическая энергия в двух системах координат выразится так:

$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{F^2 t^2}{2m}; \quad T' = \frac{mv'^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} + Fv_0 t + \frac{F^2 t^2}{2m}.$$

Так как кинетическая энергия тела в начальный момент в системе K была равна нулю, а в системе K' $T'_0 = mv_0^2/2$, то кинетическая энергия в обеих системах координат за время t изменится на величины

$$\Delta T = \frac{F^2 t^2}{2m}; \quad \Delta T' = Fv_0 t + \frac{F^2 t^2}{2m}.$$

С другой стороны, пути, пройденные телом в обеих системах координат, выразятся так:

$$S = \frac{at^2}{2} = \frac{Ft^2}{2m}; \quad S' = v_0 t + \frac{at^2}{2} = v_0 t + \frac{Ft^2}{2m},$$

а работы силы F на этих путях будут соответственно равны

$$A = FS = \frac{F^2 t^2}{2m}; \quad A' = FS' = Fv_0 t + \frac{F^2 t^2}{2m}.$$

Следовательно, $\Delta T = A$; $\Delta T' = A'$. Изменения кинетической энергии и работа силы F в обеих системах координат различны, но и в той и в другой системе координат работа внешней силы равна изменению энергии системы.

В этой цитате указывается то, что любое изменение кинетической энергии связано с работой силы, и при переходе из одной системы отсчета в другое необходимо учитывать величину эквивалентной работы. И естественно, было бы ошибочной отбрасывать из рассмотрения причину изменения энергии.

В следующей цитате из Ландау-Лившиц т.1 стр 99. утверждается что “задача движения тел в среде не является задачей механики”

До сих пор мы всегда подразумевали, что движение тел происходит в пустоте или что влиянием среды на движение можно пренебречь. В действительности при движении тела в среде последняя оказывает сопротивление, стремящееся замедлить движение. Энергия движущегося тела при этом в конце концов переходит в тепло или, как говорят, диссипируется.

Процесс движения в этих условиях уже не является чисто механическим процессом, а его рассмотрение требует учета движения самой среды и внутреннего теплового состояния как среды, так и тела. В частности, уже нельзя утверждать в общем случае, что ускорение движущегося тела является функцией лишь от его координат и скорости в данный момент времени, т. е. не существует уравнений движения в том смысле, какой они имеют в механике. Таким образом, задача о движении тела в среде уже не является задачей механики.

Можно ли вообразить какое-то движение объекта вне среды, окружающей нас? Если функция Лагранжа не может описать движение в среде, то это чистая математика, не имеющая ничего общего с реальностью.

Движения реальных материальных систем безгранично многообразны. Существует механизмы, в которых за счет инертности отдельных узлов можно производить полезную работу. Например, это механизмы с нестационарными связями. В таких механизмах связи между узлами возникают или исчезают в процессе движения системы, т.е. изменяются во времени. Однако, используя уравнения Лагранжа, невозможно вычислить эффективность инерции в механизмах. Поэтому, такие механизмы не изготавливаются и не производятся промышленностью, хотя они могут быть эффективными при выполнении определенных действий. Для исключения из рассмотрения работу инертности узлов механизма, придумано неуместная причина – равенства нулю суммы внутренних сил.

Понятие силы в динамике это как сатана в вере. В вероисповедании сатана ведет к заблуждению человека, препятствуя ему осознать истину. Подобно этому понятие силы в динамике запутает любого исследователя в его стремлении понять разницу между ускорением и замедлением материального объекта. Во всех существующих механизмах предназначенных для передачи движения увеличение скорости тел сопровождается преобразованием энергии. Чтобы увеличить скорость объекта нужно действовать с необходимой силой и при соответствующей скорости приложения силы. Скорость приложения силы это есть мощность ускоряющего механизма. Без скорости приложения, только одно понятие силы ни играет никакой роли при увеличении скорости объекта в реальной среде. Поэтому основным показателем при увеличении скорости объекта является мера движения тела, называемая кинетической энергией - $K = mV^2$. При снижении скорости достаточно только образовать сопротивление движению, для чего не потребуется никакой мощности. В этом случае скорость приложения силы не играет никакой роли. Только величина силы сопротивление становится причиной снижения скорости тела. Мерой движения в этом случае будет импульс материального тела выражающаяся формулой $P = mV$.

Выходит, что между увеличением скорости объекта в реальной среде и ее уменьшением есть огромная разница. Эту разницу можно использовать для экономии ресурсов расходуемых на движение.

Две меры движения выражают две состояния изменения скорости тела - ускорение и замедление. При увеличении скорости необходимо и приложить силу, требующуюся для ускорения, и обеспечить нужную скорость приложении силы. При снижении скорости всего этого не требуется. Значит, есть возможность получить экономию мощности. Для этого требуется найти способ снижения относительной скорости приложении силы, путем использования инертную реакцию маховика. Реактивная сила, внутренняя сила. Скорость приложения силы, в этом случае, вычисляется относительно центра инерции. Т.е. относительно внутренней точке, что не зависит от скорости самого центра инерции. Одним словом реактивная сила инерции маховика отличается от других сил тем, что для этого не требуется большая скорость приложения силы.

Свойство инертности тел заложено в основу многих машин и механизмов. Массивное тело, разогнанное до определенной скорости, сопротивляется всему, что препятствует сохранению этой скорости и может производить работу в сопротивляющейся среде. Эта работа производится кинетической энергией, запасенной в массивном теле при его разгоне. Применения инерции основано в возможности накопления энергии массивными телами. Кинетическая энергия поступательно движущегося тела пропорциональна массе m тела и квадрату скорости V движения:

$$K = \frac{m \cdot V^2}{2} \quad (1)$$

а его удельная энергия равна:

$$e = \frac{K}{m} = \frac{V^2}{2} \quad (2)$$

Существует возможность эффективного использования инерции, против сил сопротивления. Для примера анализируем инерцию транспортного средства против сопротивления окружающей среды. Разогнав автомобиль при работе двигателя на полной нагрузке, а затем, двигаясь накатом за счет накопленной при разгоне кинетической энергии, можно сэкономить горючее. Движение по инерции позволяет сэкономить расходуемые затраты на движение. Рассмотрим транспорт, движущийся накатом или любое материальное тело, движущееся по инерции. На движение этого тела действуют силы сопротивления $-F_{тр}$ окружающей среды. Чтобы преодолеть это сопротивление двигателю транспорта необходимо произвести работу :

$$A = F_{тр} \cdot ds \quad (3)$$

Или потребуется мощность:

$$P = F_{тр} \cdot V \quad (4)$$

При движении накатом этой мощности не требуется, скорость транспорта начинает снижаться. Если скорость снизится с V_1 до V_2 , то транспорт потеряет скорость $(V_1 - V_2)$ и естественно, кинетическая энергия транспорта

уменьшится на соответствующее количество. Введем понятие кинетической энергии соответствующей потеряннй скорости:

$$K' = \frac{m \cdot (V_1 - V_2)^2}{2} \quad (5)$$

При движении по инерции в сопротивляющейся среде израсходованная на трение кинетическая энергия равна кинетической энергии потеряннй скоростей, т.е. изменению кинетической энергии в собственной системе отсчета.

Таким образом, надо доказать, что при движении по инерции израсходованная кинетическая энергия на преодоление сил сопротивления равна кинетической энергии потеряннй скоростей.

$$K_1 - K_2 = \frac{m \cdot (\Delta V)^2}{2} = \frac{m \cdot (V_1 - V_2)^2}{2} \quad (6)$$

Допустим, материальное тело, имеет кинетическую энергию

$$K = \frac{m \cdot V^2}{2} \quad (7)$$

По закону сохранения энергии эта энергия равна сумме текущей кинетической энергии $0.5 \cdot m \cdot V_t^2$ и затраченной энергии на преодоление сил сопротивления с начала движения

$$K = \frac{m \cdot V_t^2}{2} + \int_0^{V - V_t} dK' \quad (8.)$$

где V_t текущая мгновенная скорость, dK' - элементарная затраченная энергия на сопротивление. Затраченная кинетическая энергия равна нулю в начале движения по инерции и увеличивается пропорционально потеряннй скорости $(V - V_t)$.

Изменения кинетической энергии связывают с работой силы. Расходованную на сопротивление кинетическую энергию можно выразить как работу сил сопротивления и формулу (8) можно написать в следующем виде:

$$K = \frac{m \cdot V_t^2}{2} + \int_0^{(V - V_t) \cdot \Delta t} F_{\text{тр}} \cdot ds \quad (9).$$

где $F_{\text{тр}}$ сумма сопротивлений движению, $F_{\text{тр}} \cdot ds$ элементарная работа сил сопротивления, $(V - V_t) \cdot \Delta t$ - путь, пройденный телом, двигаясь с замедлением.

Работа сил сопротивления в равенстве (9) выражает величину изменения кинетической энергии тела.

$$\int_0^{(V - V_t) \cdot \Delta t} F_{\text{тр}} \cdot ds = \int_0^{(V - V_t)} m \cdot \frac{du}{dt} ds = \frac{m}{2} \cdot \int_0^{(V - V_t)} 2 \cdot u du = \frac{m \cdot (V - V_t)^2}{2} \quad (10).$$

Подставляя (10) в (9) получим:

$$K = \frac{m \cdot V_t^2}{2} + \frac{m \cdot (V - V_t)^2}{2} \quad (11).$$

или если заменить начальную скорость V на V_1 и текущую скорость V_t на V_2 , то имеем:

$$K_1 - K_2 = \frac{m \cdot (V_1 - V_2)^2}{2} \quad (12).$$

Уравнение (12) доказывает, что израсходованная кинетическая энергия равна кинетической энергии потерянных скоростей.

Для сравнения количества потерянной энергии в виде (12) с традиционным выражением работы силы сопротивления получим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 - K_2 = \frac{m \cdot (V_1 - V_2)^2}{2} = \Delta A \\ K_2 - K_1 = \frac{m \cdot V_2^2}{2} - \frac{m \cdot V_1^2}{2} = \Delta A \end{array} \right. \quad (13).$$

Первое уравнение системы указывает на изменение энергии в собственной системе отсчета, второе уравнение выражает изменение энергии относительно системы отсчета, связанное с точкой опоры, т.е с точкой приложения внешней силы. Равенство потерянной кинетической энергии и работы силы сопротивления возможно только в случае, когда работа вычисляется за конечный путь пройденный телом до остановки. А в промежуточных значениях изменения кинетической энергии не будут равны элементарной работе сил трения. Причиной разногласия здесь является относительность элементарного перемещения. Элементарное перемещение относительно системы отсчета, связанное с точкой возникновения внешней движущей силы, выражается по равенству:

$$ds_1 = V \cdot dt \quad (14).$$

При вычислении работы для определения перемещения используется формула (14). Когда движение происходит по инерции, является ошибочным вычисление пути по этому уравнению. Элементарное перемещение в формуле работы сил сопротивления против инерции должно вычисляться относительно тела, движущегося по инерции, т.е. оно должно выражаться формулой:

$$ds_2 = (V - V_t) \cdot dt \quad (15)$$

Когда текущая скорость V_t меняется от V до нуля, то перемещение S в формуле работы должно вычисляться по равенству (15), иначе работа, которая

производится энергией самого тела, будет больше затраченной кинетической энергии.

Есть все основания считать, что если работа выполняется за счет собственной энергии тела, без подвода энергии, то работа должна вычисляться относительно собственной системы отсчета. Допустим, в результате внутреннего взаимодействия, т.е. столкновения, два тела обмениваются кинетической энергией и в этом обмене совершается работа за счет собственной энергии тела. При вычислении произведенной работы, перемещения в формуле работы вычисляются относительно тел, участвующих во взаимодействии. Если предположить, что взаимодействия происходят в сопротивляющейся среде, то для преодоления сопротивления среды работа производится относительно тел участвующих во взаимодействии.

Из вышеизложенного следует, что элементарная работа движущей силы отличается от элементарной работы силы трения против инерции. Работа движущей силы $A_{дв}$ определяется формулой:

$$\Delta A_{дв} = K_2 - K_1 = F_{тр} \cdot ds = F \cdot V \cdot dt \quad (16)$$

Работа сил сопротивления против инерции $A_{ин}$ выражается в следующем виде:

$$\Delta A_{ин} = K_1 - K_2 = F_{тр} \cdot ds = F_{тр} \cdot \frac{a \cdot (dt)^2}{2} = F_{тр} \cdot \frac{dV \cdot dt}{2} \quad (17)$$

где a ускорение тела.

Затраты энергии на увеличение скорости от V_1 до V_2 не равны потере энергии, когда скорость снижается на то же количество, при $V_1 > 0$ и $V_2 > 0$. И мощность выраженная формулой:

$$P = F \cdot V$$

не определяет величину изменения кинетической энергии во времени, когда движение происходит по инерции. Для определения изменения кинетической энергии за единицу времени, работу инерции (17) делим на dt :

$$\frac{A_{ин}}{dt} = \frac{F_{тр} \cdot a \cdot (dt)^2}{2 \cdot dt} = F_{тр} \cdot \frac{dV}{2} \quad (18)$$

Если изменение скорости dV выразить через ускорение, так как изменение скорости произойдет за рассматриваемый промежуток времени, то формулу мощности для движения по инерции можно выразить в следующем виде:

$$P_{ин} = F_{тр} \cdot \frac{a \cdot dt}{2} \quad (19)$$

$P_{ин}$ можно назвать мощностью сил сопротивления против инерции, она является элементарной функцией времени и выражает расход кинетической энергии во времени для преодоления сил сопротивления. Зависимость изменения кинетической энергии и пройденного пути позволяет построить графическое изображение работы движущей силы и работы трения против инерции:

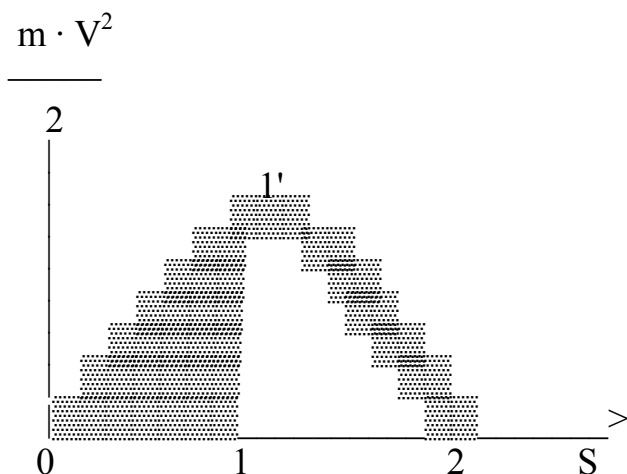


рис-1

При возрастании кинетической энергии работа изображается площадью фигуры 011', при снижении скорости работу изображает площадь 2 1'

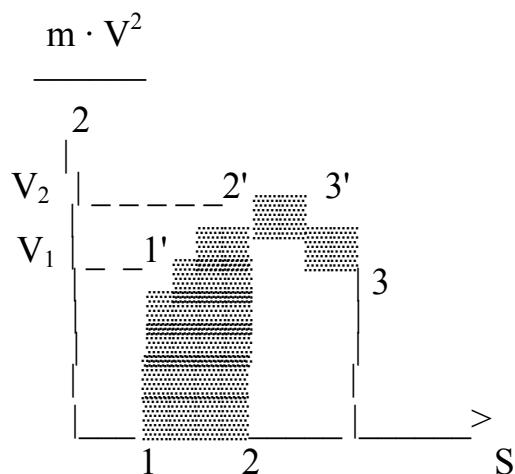


рис-2

При увеличении скорости от V_1 до V_2 работу выражает площадь 11'22', при снижении 2'3'3

Таким образом, можно утверждать, что между работой двигателя затраченной на преодоление сил сопротивления и работой сил сопротивления при движении по инерции есть существенная разница. При установившемся движении мощность двигателя затрачивается на поддержание скорости в определенном уровне, преодолевая сопротивления. Потребность мощности увеличивается с возрастанием скорости. Сравнивая расходуемую энергию, на поддержание скорости в сопротивляющейся среде с потерянной энергией при движении по инерции можно сделать вывод, что использование инерции позволяет сэкономить расходуемую энергию на движение.

Возможную экономию можно вычислить, сравнивая необходимую мощность для поддержания скорости с мощностью создаваемой движением по инерции против сил сопротивления в виде (19).

Мощность необходимая для поддержания скорости выражается по формуле:

$$P = F \cdot V$$

Отношение мощности, создаваемой движением по инерции против сил сопротивления на необходимую мощность для поддержания скорости, дает разницу между энергией, затраченной двигателем для преодоления сил сопротивления, и кинетической энергией, потерянной при движении по инерции.

$$\frac{P_{ин}}{P} = \frac{F_{тр} \cdot \frac{dV}{2}}{F_{тр} \cdot V} = \frac{dV}{2 \cdot V} \quad (20)$$

отношение $\frac{dV}{2 \cdot V}$ можно интегрировать с учетом изменения

скорости за конечный промежуток времени.

$$\int \frac{dV}{2 \cdot V} = \frac{1}{2} \cdot \ln V \quad (21).$$

Затраченная энергия на поддержание скорости $\frac{1}{2} \cdot \ln V$ раз больше энергии,

расходуемой при движении по инерции. Такую экономию можно получить, если энергия двигателя расходуется не на преодоление сил сопротивления, а расходуется на восстановление потерянной скорости. Из формулы (21) следует, что при установившемся движении возникает баланс мощностей движущей силы и сил сопротивления, и этот баланс устанавливается в соотношении выраженной следующим равенством:

$$\frac{P_{тр}}{P} = \frac{1}{2} \cdot \ln V \quad (22)$$

Если энергию двигателя накапливать в виде кинетической энергии, а инерцию использовать для преодоления сил сопротивления, то это позволило бы увеличить мощность движущей силы $0,5 \cdot \ln V$ раз. И тем самым получить возможность снизить мощность используемого двигателя.

Рассмотрим конкретный числовой пример, показывающий эффективность использования инерции. Велосипедист при спокойной езде движется со скоростью 18 км/час и развивает мощность 120 ватт. Когда используется инерция маховика для преодоления сопротивлений, то маховик позволяет увеличить эту мощность в $0,5 \cdot \ln 18$ раз.

$$P = \frac{120}{2} \cdot \ln 18 = 173,46$$

Если энергию велосипедиста передать маховику, то в маховике накапливается энергия, позволяющая двигаться с большей скоростью. Скорость увеличивается до достижения баланса мощности инерции и мощности сил сопротивления. Это предварительная оценка результата, потому что приведенная линейная скорость точек маховика будет больше скорости движения велосипедиста, т.е. > 18 км/час.

Использование инерции может решить энергетическую проблему для совершения механической работы. В настоящее время все полезные и вредные сопротивления преодолеваются энергией, вырабатываемой двигателями, затраты энергии увеличиваются пропорционально скорости движения. Если эти

сопротивления преодолеваются механической энергией, то энергия вырабатываемая двигателем, расходуется на сообщение ускорения и расход энергии не зависел бы от скорости движения рабочего органа. Потребность других видов энергии для совершения механической работы в этом случае существенно сокращается.

В заключении можно отметить, что экспериментальные исследования использования инерции против сопротивлений дают положительные результаты и ожидаются практические возможности преодоления сопротивления только инерцией.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гулиа Н.В. Инерция М.; Наука, 1982
2. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. “Теоретическая физика” т.1
3. Поль Р.В. Механика, акустика и учения о теплоте. М.; Наука, 1971.
4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. /пер. с англ. М.; Мир, 1976.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.; Наука, 1971.