

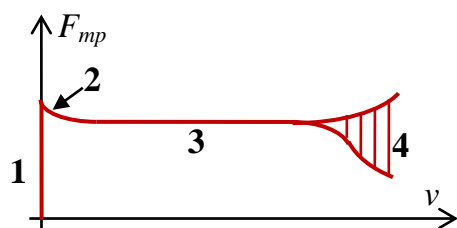
**10-11 классы, подготовка к теоретическому туру
олимпиады школьников «Робофест» по физике
Теоретический обзор к занятию 3 (20.01.2017).**

Тема: «СИЛЫ И ДВИЖЕНИЕ. РОЛЬ СИЛ ТРЕНИЯ. МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ».

В рамках нашего курса особое внимание уделяется **силам трения**. Основная особенность этих сил – их «многоликость». Конечно, они все имеют общую природу, так как обусловлены электромагнитным взаимодействием молекул на границах соприкасающихся тел. Все они являются *диссипативными* силами – отличная от нуля работа этих сил всегда отрицательна и уменьшает механическую энергию системы, переводя ее в тепло (то есть в энергию молекулярного движения). Однако проявления действия этих сил очень многообразны, и поэтому способы теоретического описания этих сил в разных ситуациях также отличаются довольно сильно.

Для успешного решения задач, посвященных движению с учетом трения, очень важно иметь правильное качественное понимание физики протекающих процессов. Поэтому необходимо очень подробно разобрать теорию по этому вопросу. В этом обзоре она описывается в объеме, несколько превышающем «необходимый минимум» для решения задач, как раз для создания хорошего понимания.

Силы *сухого трения* возникают при соприкосновении твердых тел, если существуют внешние причины, вызывающие относительное движение (*скольжение*) этих тел. Таким образом, силы сухого трения можно отнести к силам реакции, ибо они возникают «в ответ» на действие этих «внешних причин» и принимают в точности те значения, которые нужны для предотвращения проскальзывания. Если силы трения способны поддерживать равновесие тел, то их называют силами *трения покоя*. В этом случае скольжение тел друг по другу отсутствует, и тела движутся вместе, то есть их движение подчинено *условию связи*. Задачи о подобных ситуациях рассматривались в предыдущем занятии. Однако силы трения покоя не могут увеличиваться до бесконечности – всегда существует их предельное (максимальное) значение, и если внешние силы, сдвигающие тела, превысят это значение, то начинается проскальзывание тел. Теперь силу сухого трения уже называют силой *трения скольжения*, так как закономерности ее поведения изменяются. Рассмотрим некий «характерный» график зависимости силы сухого трения от относительной скорости соприкасающихся тел.



- Участок **1**, отвечающий нулевой скорости, описывает силы **трения покоя**, которые могут принимать любые нужные для уравнивания внешних сил значения от нуля до максимального значения F_{\max} .
- Участок **2** описывает «*эффект застоя*». Для того, чтобы сдвинуть тела, требуется большая сила, чем для поддержания их относительного движения. Поэтому сразу после начала движения при постоянной внешней силе тела быстро «разгоняются» (их ускорение растет). Возникающий участок «отрицательного» наклона кривой $F_{\text{тр}}(v)$ играет важную роль во многих физических явлениях – например, в передаче энергии от смычка к струне в некоторых музыкальных инструментах.
- Участок **3** отвечает **трению скольжения** – величина силы трения практически не зависит от скорости и пропорциональна силе нормальной реакции, возникающей при прижатии тел друг к другу: $F_{\text{тр}}(v) \approx \text{const} \approx \mu N$. Коэффициент пропорциональности μ называют коэффициентом трения. Эксперимент показывает, что этот коэффициент

не изменяется при изменении площади соприкосновения тел, если при этом не меняется характер взаимодействия поверхностей.

- Участок 4 отвечает фазе «видоизменения» соприкасающихся поверхностей. В самом деле, при значительных скоростях поверхности могут плавиться (например, при движении конька по льду последний начинает плавиться даже при не очень больших значениях скорости, обеспечивая «легкость» скольжения), могут частично разрушаться. Все это может приводить к очень значительным изменениям силы трения – как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. В дальнейшем – при «сверхбольших» значениях относительной скорости плавятся почти любые тела, да и физика взаимодействия поверхностей тел настолько меняется, что возникающие явления уже нельзя относить к «сухому трению».

Однако в задачах, построенных на основе школьного курса физики, большинство из описанных явлений не рассматривается. Даже в олимпиадных задачах используется существенно упрощенная картина. Обычно пренебрегают эффектом застоя, и считают, что максимальное значение силы трения покоя равно силе трения скольжения: $F_{\max} \approx \mu N$, и не рассматривают явления, связанные с изменением свойств поверхностей. Таким образом, зависимость силы сухого трения от скорости сводится к упрощенной:

$$F_{\text{тр}}(v) \approx \begin{cases} F_{\parallel}^{(\text{внеш})}, & |F_{\parallel}^{(\text{внеш})}| \leq \mu N, v = 0 \\ \mu N, & v \neq 0 \end{cases}$$

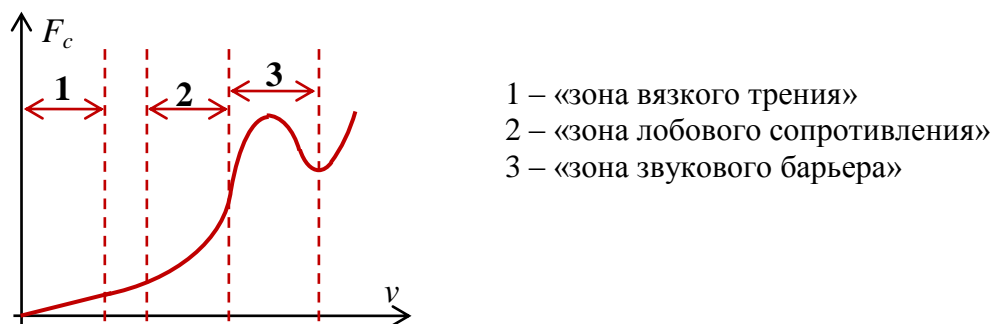
(здесь $F_{\parallel}^{(\text{внеш})}$ - параллельная поверхности соприкосновения составляющая внешних сил).

Таким образом, силу сухого трения считают постоянной в процессе движения тела. Поэтому методы решения обычны для школьных задач для движения под действием постоянных сил: ускорения тел находятся из уравнений движения, а затем по ускорениям находят скорости и координаты. При наличии других сил, которые не остаются неизменными, полезно использовать закон изменения механической энергии. Особенности задач с силой сухого трения состоят в следующем: во-первых, надо помнить о переходе силы трения скольжения в силу трения покоя сразу после остановки, во-вторых – надо учитывать, что при неизменной величине направление силы трения скольжения меняется вместе с изменением направления движения (сила трения **всегда направлена против скорости тела относительно поверхности**).

При движении тела в жидкости или газе возникают силы, препятствующие этому движению – *силы сопротивления*. Аналогичным образом силы, действующие на тело со стороны среды, возникают при обтекании жидкостью или газом покоящегося тела. Ясно, что при описании взаимодействия тела со средой важна величина скорости относительно среды, поэтому эти две ситуации фактически не отличаются друг от друга. Поэтому будем рассматривать их одновременно. В однородной жидкой или газообразной среде силы сопротивления возникают только при движении тела относительно среды, то есть $F_{\text{сопр}}(0) = 0$, и сила сопротивления всегда направлена против скорости тела относительно среды. Для небольших тел при низких скоростях основная причина торможения движения тела в среде – *жидкое, или вязкое, трение*, возникающее благодаря взаимодействию поверхностных молекул тела с молекулами ближнего к телу слоя жидкости. В такой ситуации течение жидкости вблизи тела является *ламинарным (безвихревым)*, а величина силы вязкого трения пропорциональна скорости: $F_{\text{тр}}(v) = \alpha v$. Коэффициент α зависит от свойств среды, размеров и формы тела: $\alpha = f \eta p$. Здесь p - максимальный периметр сечения тела, перпендикулярного скорости, η - характеристика «вязких» свойств среды (которую так и называют: *вязкость*), а f - коэффициент, зависящий от формы тела. Обычно (если форма тела не слишком сложная) он по порядку величины близок к единице: для выпуклых гладких тел $1 < f < 6$, для шара $f = 3$. При увеличении скорости и размеров тела, при усложнении его формы (например, при появлении острых «краев») ламинарность обтекания тела средой нарушается: позади тела возникают *турбулентные завихрения* – быстрые вихревые движения среды. При этом наряду с вязким трением возникает эффект лобового сопротивления: на переднюю поверхность тела натекает упорядоченный поток жидкости или газа, в то время

как вблизи задней поверхности движения частиц среды неупорядоченные. Поэтому возникает разность давлений (так называемый «динамический напор») и сила лобового сопротивления, величина которой пропорциональна квадрату скорости: $F_{comp}(v) = \beta v^2$. Здесь β зависит от плотности среды ρ и площади поперечного сечения тела S : $\beta = \tilde{f} \frac{\rho}{2} S$. Коэффициент \tilde{f} - величина порядка единицы для тел не слишком сложной формы (типичные значения для выпуклых тел $0.1 \leq \tilde{f} \leq 1.5$, для шара $\tilde{f} = 0.4$). Сопоставление формул (с учетом того, что $S/\rho \approx L$ - характерный поперечный размер тела) подсказывает, что поведение силы сопротивления в заданной среде действительно определяется скоростью и размерами тела: при $L \cdot v \leq 10 \eta / \rho$ доминирующим механизмом является вязкое трение (в этом случае можно считать, что сила сопротивления линейна по скорости), а при $L \cdot v \gg 100 \eta / \rho$ доминирует лобовое сопротивление (квадратично). Например, для воздуха при нормальных условиях $\eta / \rho \approx 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$, для воды $\eta / \rho \approx 1.15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$, для глицерина $\eta / \rho \approx 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 / \text{с}$. В олимпиадных задачах обычно используется одна из зависимостей. При этом обычно в условии задаются не параметры среды, а непосредственно указывается, какой из зависимостей следует пользоваться. Полезно, однако, понимать общую тенденцию: для «маленьких и медленных» тел сила сопротивления среды линейно зависит от скорости, для «больших и быстрых» - квадратично. Отметим, что в реальности существует и «промежуточный» диапазон $L \cdot v \approx 100 \eta / \rho$, когда сила сопротивления описывается некой «комбинированной» формулой.

Проведенный анализ корректен в предположении, что рассматриваемые значения скоростей тел малы по сравнению со скоростью звука в среде. Звук – распространение изменений давления и плотности в среде, поэтому перед телом, движущимся со скоростью, близкой к скорости звука, формируется «неубегающее» уплотнение, и сила сопротивления резко возрастает (так называемый «звуковой барьер»). Строго говоря, движение точно со скоростью звука динамически неустойчиво: оно требует постоянного увеличения мощности двигателя, и к тому же при любом изменении скорости (в том числе при ее увеличении!) сила сопротивления довольно резко убывает. Подытоживая сказанное, изобразим «типичную» зависимость силы сопротивления от скорости тела относительно среды.



Очень важно также умение проводить анализ «энергетики» любого процесса в физике. Это же относится к движению и взаимодействию тел. В связи с этим обсудим понятие «механическая энергия». Всякое движущееся тело обладает **кинетической энергией**. В общем случае эта энергия является суммой энергии поступательного движения и энергии вращательного движения. Энергия поступательного движения тела массой m , центр масс

которого движется со скоростью v , равна $E_k = \frac{mv^2}{2}$. Энергия вращательного движения

считается гораздо сложнее (при поступательном движении все массивные элементы тела движутся с одной и той же скоростью, а при вращательном скорости разных элементов могут быть различны). Ее приходится считать, разбив тело на «почти точечные» элементы и суммируя энергии их движения. В школьных задачах такой случай появляется очень редко.

Кинетическая энергия изменяется за счет работы сил, действующих на тело. Механическая работа силы \vec{F} при малом перемещении тела на $\Delta\vec{r}$ равна $\Delta A = \vec{F} \cdot \Delta\vec{r} = F |\Delta\vec{r}| \cos(\alpha)$ (здесь α – угол между \vec{F} и $\Delta\vec{r}$). Силы могут быть разделены на *потенциальные* (или

консервативные) и диссипативные в зависимости от того, как они меняют кинетическую энергию тела – возвратным или безвозвратным образом. Например, при движении тела вверх в поле тяжести оно теряет кинетическую энергию за счет работы силы тяжести вплоть до полной остановки, но затем оно движется вниз, и при этом его кинетическая энергия уже возрастает – вновь за счет работы силы тяжести, т. е. сила тяжести «возвращает» отнятую энергию. Поэтому сила тяжести – потенциальная (консервативная). Можно рассматривать этот процесс как переход механической энергии из одной формы в другую – из кинетической в *потенциальную* и обратно. Напротив, сила трения, забрав у тела его кинетическую энергию, не будет разгонять его после остановки – здесь энергия тела переходит в немеханическую форму (в тепло). Отметим, что «возвратность» забираемой силой энергии можно установить по следующему признаку (*признак потенциальности*): если перемещать тело по замкнутой траектории, то работа потенциальной силы должна равняться нулю. Следствием этого свойства является то, что работа потенциальной силы при переносе тела из точки 1 в точку 2 не зависит от пути переноса и ее можно представить как разность значений некоторой функции координат – потенциальной энергии (то есть потенциальную энергию можно определить как величину, равную работе по перемещению тела из точки с данными координатами в некоторую «нулевую» точку). Видно, что потенциальная энергия определена с точностью до постоянного слагаемого (есть произвол в выборе «нулевой» точки).

В результате, если ввести понятие полной механической энергии как суммы кинетической и потенциальной энергий всех входящих в рассматриваемую систему тел, то можно сформулировать закон сохранения::

Если в механической системе отсутствуют диссипативные силы, то полная механическая энергия сохраняется в процессе движения: $(E_K + U)_{t=t_1} = (E_K + U)_{t=t_2}$.

Сила и потенциальная энергия связаны между собой: например, для одномерного случая

$$F_x \cdot \Delta x = U(x) - U(x + \Delta x) \Rightarrow F_x = - \left. \frac{\Delta U}{\Delta x} \right|_{\Delta x \rightarrow 0} = -U' \quad (\text{то есть сила равна производной от}$$

потенциальной энергии со знаком минус!).

Приведем наиболее часто используемые в задачах по материалам школьного курса физики выражения для потенциальной энергии:

- потенциальная энергия тела на высоте h в однородном поле тяжести (энергия взаимодействия с массивным близко расположенным телом): $U = mgh$.

- потенциальная энергия деформированной пружины (величина деформации – x): $U = \frac{kx^2}{2}$.

- потенциальная энергия гравитационного взаимодействия двух тел на расстоянии r_{12} :

$$U = -G \frac{m_1 m_2}{r_{12}}.$$

- потенциальная энергия электростатического взаимодействия заряженных тел на расстоянии

$$r_{12}: U = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}}, \quad k \equiv \frac{1}{4\pi \epsilon_0}.$$

Если в системе есть диссипативные силы (силы трения, силы сопротивления воздуха), то механическая энергия убывает, причем изменение механической энергии в точности равняется работе диссипативных сил (ясно, что эта работа всегда отрицательна):

$$\Delta E = \Delta A_{\text{д}} = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r} = \vec{F} \cdot \vec{v} \Delta t.$$

Поскольку силы трения и силы сопротивления в «подходящей» системе отсчета всегда направлены против скорости, то $\vec{F} \cdot \vec{v} \Delta t = -F \cdot v \Delta t < 0$. Таким образом, скорость убывания механической энергии равна мощности диссипативных сил (напомним,

мощность – это работа в единицу времени, и $P_{\text{д}} = -F \cdot v$): $\frac{\Delta E}{\Delta t} = P_{\text{д}}$.