

## РАЗДЕЛ 3. ДИНАМИКА МТ.

# *Тема 1. Динамические характеристики МТ.*

**П.1. Инерциальные системы отсчета.**

**П.2. Динамические характеристики и уравнения.**

**П.3. Импульс. Масса. Сила**

**П.4. Сила. Некоторые силы в механике.**

## П.1. Инерциальные системы отсчета.

Проблема: Существуют ли особые системы отсчета, в которых физические законы выглядят особенно просто?

*Инерциальными (ИСО) называются системы отсчета, в которых изолированная МТ покоится или движется с постоянной скоростью  $\vec{v} = const$ .*

Вопрос: А можно ли построить такую систему отсчета?

Ответ: Как показала практика, существует, по крайней мере, одна система, в которой выполняется это условие.

Тела отсчета в этой системе отсчета – максимально удаленные звезды. Она называется основной.

*Любая система отсчета, которая движется с постоянной скоростью относительно любой инерциальной СО, также является инерциальной.*

Дальнейшее рассмотрение всех процессов будем проводить только в инерциальных системах отсчета.

Механический принцип относительности:

*Все законы механики выглядят одинаково, если входящие в них характеристики измерены в одной и той же инерциальной системе отсчета, которая может быть выбрана произвольно.*

Следствие: Исследуя механические процессы невозможно выделить абсолютную систему отсчета, которую можно было бы считать абсолютно неподвижной.

Дополнение: Другая формулировка механического принципа относительности:

*Все законы механики инвариантны относительно преобразований Галилея (при малых скоростях) и преобразований Лоренца (при любых скоростях).*

Замечание: этому принципу удовлетворяют и основные законы из других разделов физики.

## П.2. Динамические характеристики и уравнения.

Проблема: Существуют ли особые характеристики движения, которые напрямую связаны с характеристиками внешних воздействий (ВВ)?

*Динамическими называются характеристики движения, для которых в инерциальных системах отсчета быстрота изменения (производная по времени) равна соответствующей характеристике внешнего воздействия.*

Динамическое уравнение (ДУ) связывает динамическую характеристику «А» с характеристикой внешнего воздействия «В» и имеет вид

$$\frac{dA}{dt} = B.$$

ТЕСТ

*Быстрота изменения со временем любой динамической характеристики движения (ДХД) равна соответствующей характеристике внешнего воздействия (ХВВ).*

Еще одной особенностью ДХД является наиболее простой способ формирования ДХД системы, состоящей из нескольких частей: *ДХД системы есть сумма ДХД всех ее частей.*

Следствие: ДХД сохраняется в отсутствие внешних воздействий.

Основные свойства воздействий:

*Суммарное воздействие на систему равно сумме всех отдельных воздействий (принцип суперпозиции).*

*Воздействие на систему в целом распределяется на отдельные ее части, а сумма воздействий на каждую часть равна исходному воздействию (дистрибутивность).*

Для механического движения есть 3 ДХД:

ДХД	ХВВ	ДУ
Импульс $\vec{p} = m \vec{V}$	Сила $\vec{F}$	$\frac{d \vec{p}}{dt} = \vec{F}$
Момент импульса $\vec{L} = [\vec{r}, \vec{p}]$	Момент силы $\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}]$	$\frac{d \vec{L}}{dt} = \vec{M}$
Энергия $E = mc^2$	Мощность $W = (\vec{F} \cdot \vec{V})$	$\frac{dE}{dt} = W$

Замечание: Считается, что эти характеристики отражают фундаментальные вещи: однородность и изотропность пространства и однородность времени.

### П.3. Импульс. Масса. Сила

*Импульс – векторная динамическая характеристика движения, пропорциональная скорости.*

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

Скалярный коэффициент пропорциональности между импульсом и скоростью является характеристикой объекта (МТ), которая называется массой.

Иногда говорят: «Масса, есть мера инертных свойств объекта».

*Инертность есть свойство тела «сопротивляться» внешнему воздействию.*

Чем более инертно тело, тем больше оно «сопротивляется» внешнему воздействию.

ТЕСТ

*МАССА* есть коэффициент пропорциональности между кинематической характеристикой (скоростью  $\vec{V}$ ) и динамической характеристикой (импульсом  $\vec{P}$ ).

Из основных свойств импульса, как динамической характеристики следует (из решения задачи по распаду частицы на две – см. специальную литературу):

$$m = m_0 \gamma,$$

где

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$m_0$  - константа для данного объекта, называется массой покоя.

*Масса покоя тела инвариантна (не зависит от скорости).*

При  $V \ll c$   $\gamma \cong 1$  и  $m \cong m_0$ .

Сила – есть векторная характеристика внешнего воздействия, определяющая быстроту изменения импульса (как по величине, так и по направлению).

$$\frac{d \vec{p}}{dt} = \vec{F}_{\text{СУМ}}.$$

Это есть *динамическое уравнение* (ДУ) для импульса. Иногда его называют вторым законом Ньютона в общем виде, а иногда - уравнением Ньютона-Эйнштейна.

Силы обладают свойством суперпозиции (суммируемости):

$$\vec{F}_{\text{СУМ}} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i.$$

Проблема: Получить второй закон Ньютона в известном виде, с которым мы успешно работали в школьной физике.

Динамический ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ:  $m = \text{const}$ .  
закон

$$\frac{d \vec{p}}{dt} = \vec{F}_{\text{сум}} \Rightarrow \frac{d}{dt} \cdot (m \cdot \vec{v}) = \vec{F}_{\text{сум}} \Rightarrow m \cdot \frac{d \vec{v}}{dt} = \vec{F}_{\text{сум}}.$$

Отсюда  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m},$

$m \vec{a} = \vec{F}_{\text{сум}}$  - второй закон Ньютона (для  $m = \text{const}$ ).

ТЕСТ

ТЕСТ

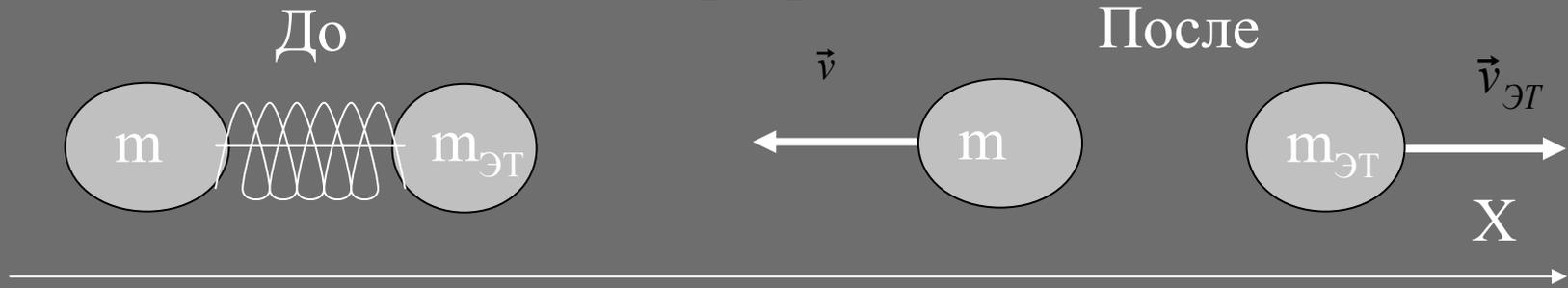
ТЕСТ

ТЕСТ

# ПРОБЛЕМА: Как измерять массу?

Используем свойства импульса в эксперименте с двумя телами, одно из которых - эталон. Пружина сжата, связана нитью.

Событие - разрыв нити



$\vec{P}_{СУМ}^{ПОСЛЕ} = \vec{P}_{СУМ}^{ДО}$  - закон сохранения импульса

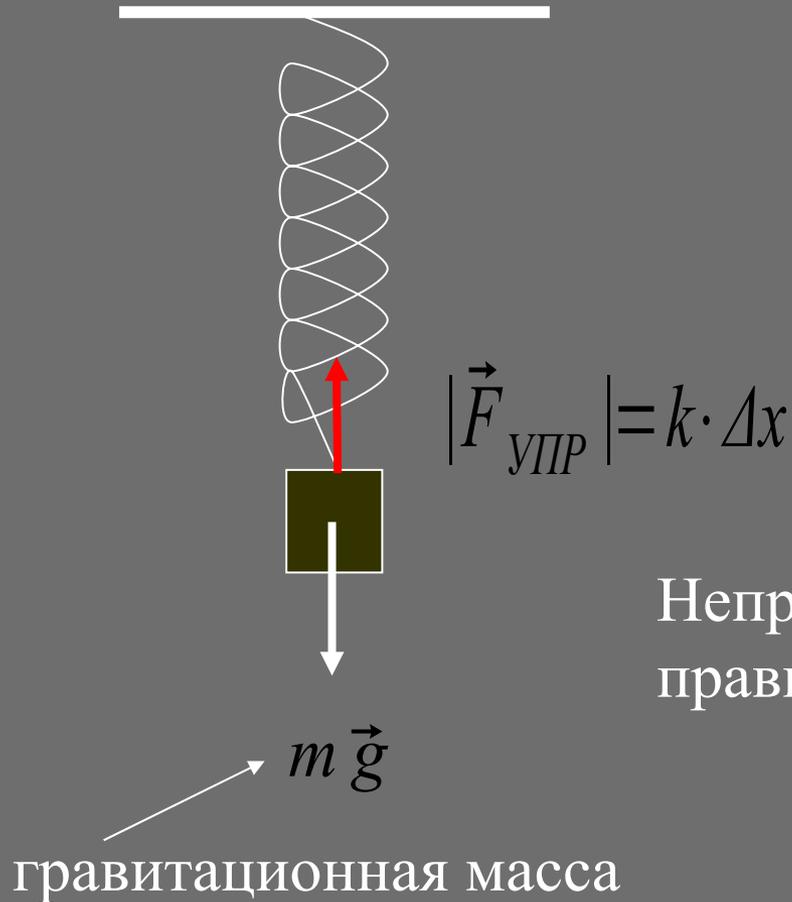
$$m \cdot \vec{v} + m_{ЭТ} \cdot \vec{v}_{ЭТ} = 0$$

Проектируем на X:

$$m \cdot (-v) + m_{ЭТ} \cdot v_{ЭТ} = 0, \quad \text{отсюда} \quad m = \frac{v_{ЭТ}}{v} m_{ЭТ} \quad - \text{результат.}$$

ТЕСТ

Неправильный способ измерения массы использует гравитационную силу, которая зависит от другой массы, называемой «гравитационной».



К счастью, выполняется «Принцип эквивалентности инертной и гравитационной масс: Они одинаковы!».

Неправильный способ измерения дает правильный результат!

$$m = \frac{k \cdot \Delta x}{g}$$

## Свойства массы.

Масса суммируется (аддитивна):  $[m_{\text{СУМ}} = \sum m_i]$ .

Масса не инвариантна

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \geq m_0.$$

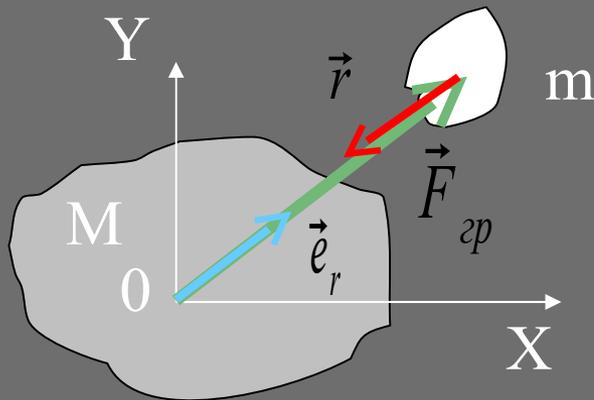
## П.4. Сила. Некоторые силы в механике.

Сила – векторная характеристика внешнего воздействия, определяющая быстроту изменения импульса.

### 1) Гравитационная сила

$$\vec{F}_{gp} = G \cdot \frac{mM}{r^2} (-\vec{e}_r)$$

выражение для гравитационной силы - закон всемирного тяготения, где  $\vec{e}_r$  - единичный вектор, направленный вдоль радиус-вектора тела массы  $m$  ( $|\vec{e}_r| = 1$ ), а центр тяжести тела массы  $M$  расположен в начале координат.

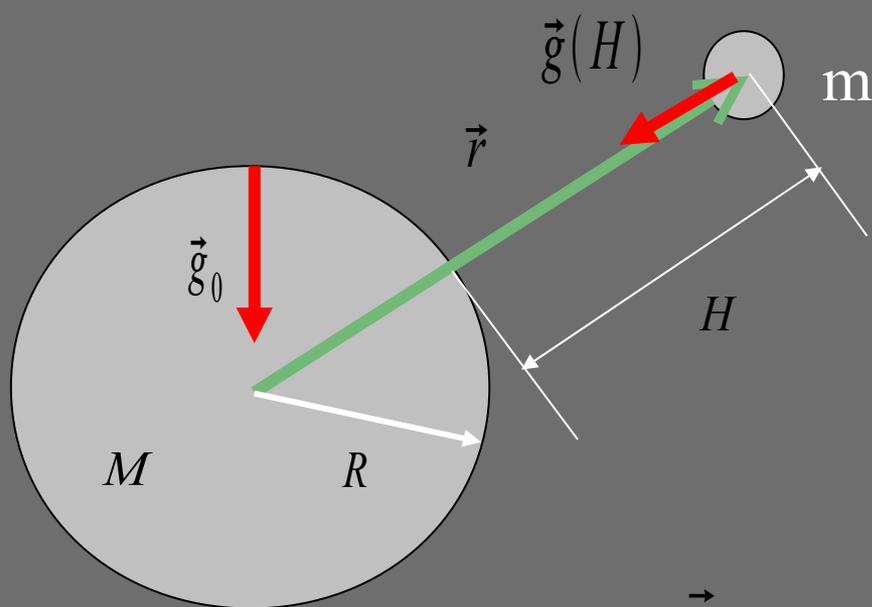


$$\vec{F}_{gp} = m \vec{g}$$

- хорошо известное выражение, где  $m$  – гравитационная масса.

ТЕСТ

Задача: Найти ускорение свободного падения  $g(H)$  для тела, находящееся на высоте  $H$  над поверхностью планеты, если известно ускорение свободного падения на ее поверхности  $g_0$ .



$$\vec{F}_{sp} = m \vec{g}(H)$$

$$|\vec{F}_{sp}| = G \cdot \frac{mM}{r^2},$$

где  $r = R + H$ .

Для поверхности

$$\vec{F}_{sp0} = m \vec{g}_0, \quad F_{sp0} = G \cdot \frac{mM}{R^2}.$$

$$mg(H) = G \cdot \frac{mM}{(R+H)^2}, \quad mg_0 = G \cdot \frac{mM}{R^2} \Rightarrow g(H) = \frac{g_0}{\left(1 + \frac{H}{R}\right)^2}.$$

## Анализ ответа:

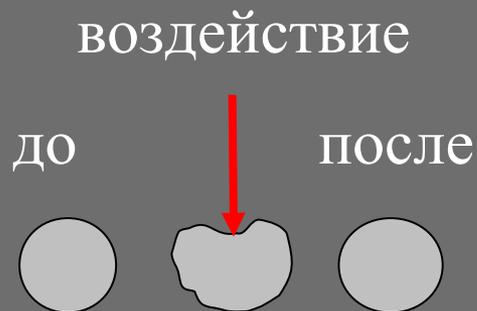
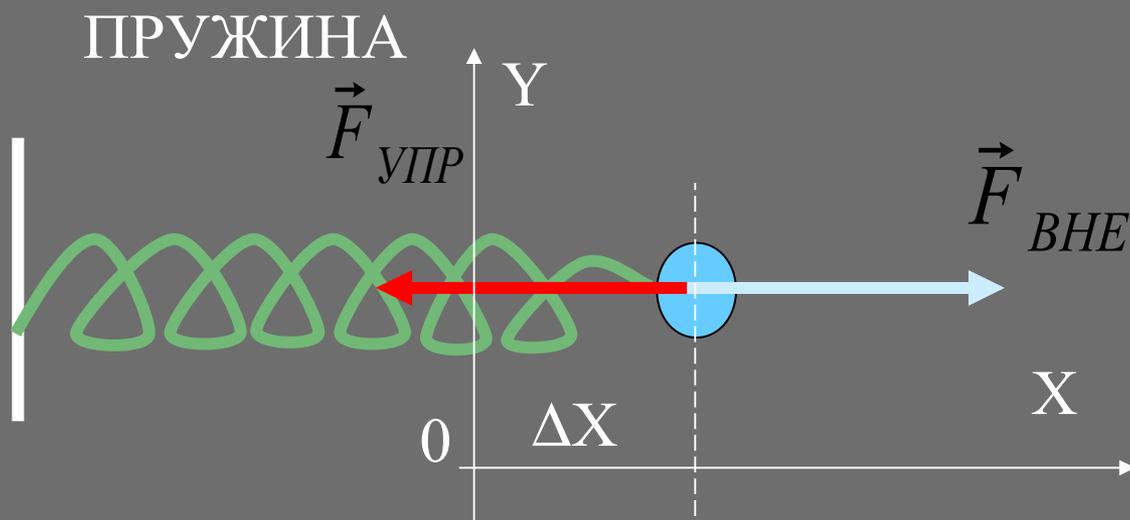
При  $H = 0$  (на поверхности) имеем  $g(H=0) = g_0$ , что абсолютно справедливо.

При  $H \rightarrow \infty$  имеем  $g(H) \rightarrow 0$ , т.е. воздействие отсутствует.

## б) Сила упругости.

Возникает, когда форма твердого тела изменяется. АУТ (абсолютно упругое тело) – тело, форма которого восстанавливается после снятия внешнего воздействия.

Деформация  $\equiv$  изменение формы.



$$F_{УПР. X} = -k\Delta X \quad \text{- закон Гука.}$$

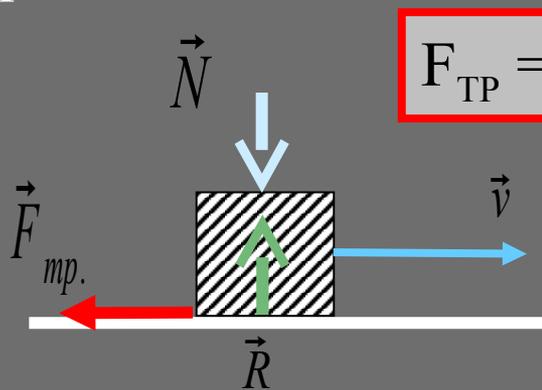
ТЕСТ

Обобщение:  $F_{\text{УПР.Х}} = -k' \frac{\Delta x}{L_0}$ , где  $k = \frac{k'}{L_0}$

$k$  – коэффициент упругости данной пружины,  
 $k'$  – const для данной проволоки .

в) Сила трения скольжения.

Возникает при прижатии с силой  $N$  одной поверхности к другой и при наличии движения одной поверхности относительно другой.



$$F_{\text{ТР}} = kN,$$

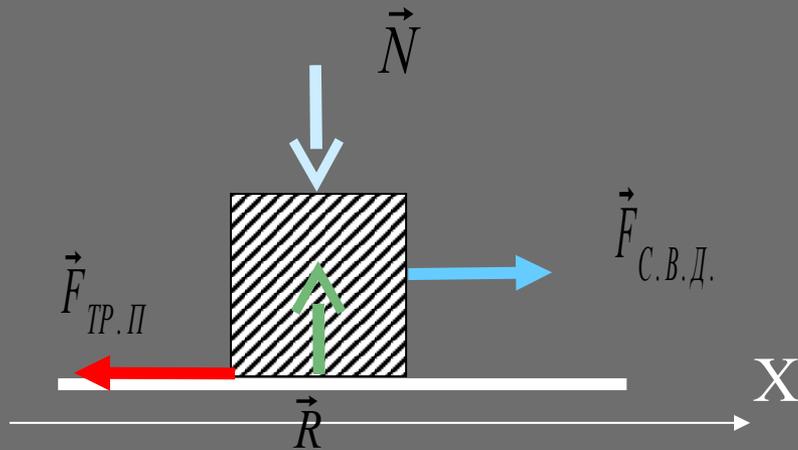
где  $k = \text{const}$  и называется коэффициентом трения движения. Сила трения скольжения направлена против скорости относительного движения, т.е. вдоль поверхностей.

Величина силы трения не зависит от скорости (в 1-ом приближении) и пропорциональна силе  $N$ , сжимающей поверхности.

ТЕСТ

г) Сила трения покоя. Возникает при наличии

- силы, сжимающей две неподвижные поверхности ( $N$ ),
- силы, стремящейся вызвать движение и направленной вдоль поверхностей  $\vec{F}_{\text{С.В.Д.}}$ .



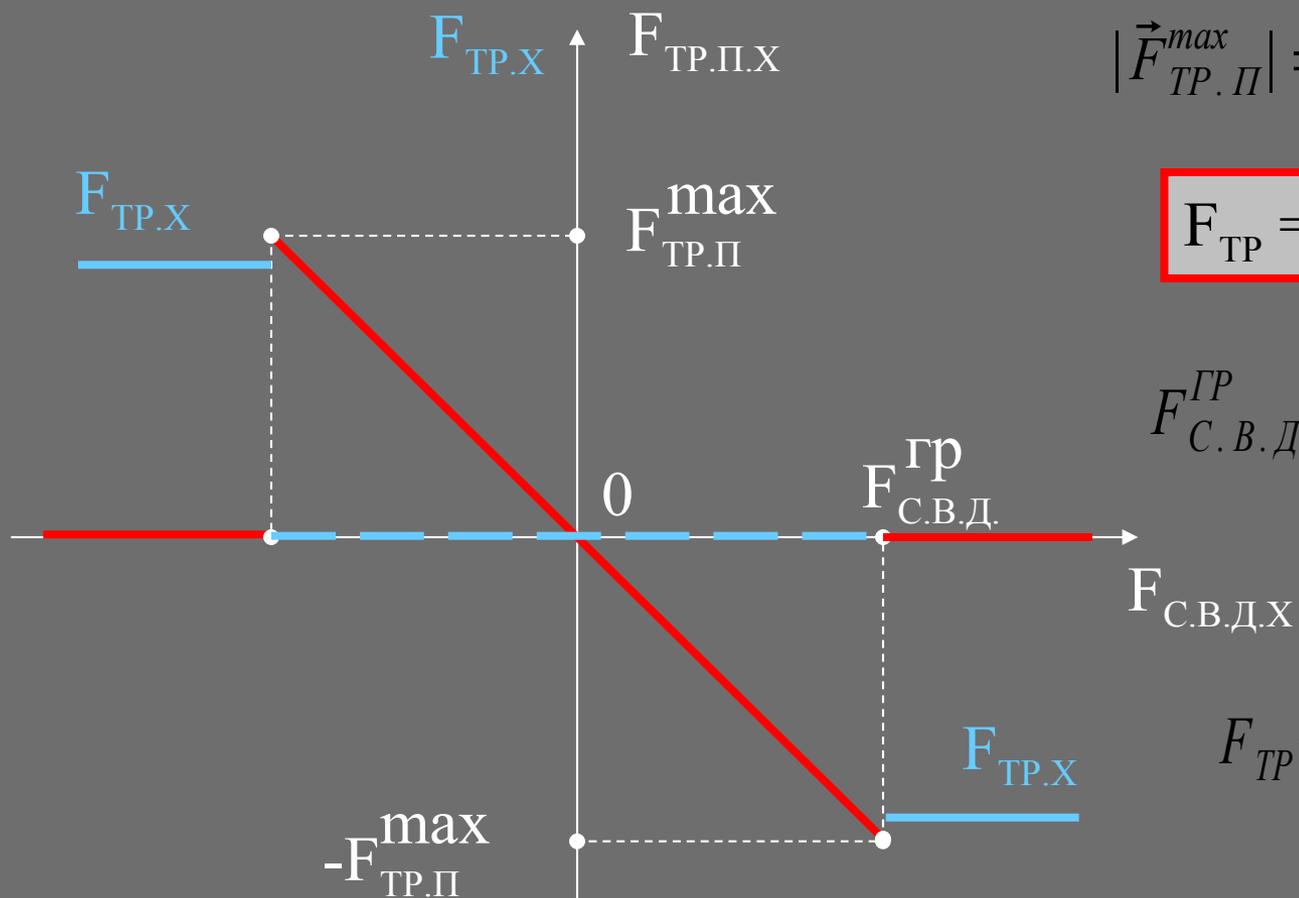
Направлена против силы, стремящейся вызвать движение и равна ей по величине до ОПРЕДЕЛЕННОГО ПРЕДЕЛА.

Имеет максимальное значение  
силе, сжимающей поверхности

$$\vec{F}_{\text{тр.п}}^{\text{max}}, \text{ пропорциональное}$$
$$|\vec{F}_{\text{тр.п}}^{\text{max}}| = k_{\text{п}} N.$$

Коэффициент трения покоя  $k_{\text{п}}$  немного превышает  
обычный коэффициент трения  $k$ .

# Вопрос: Как меняется сила трения покоя?



$$|\vec{F}_{\text{ТР.П}}^{\text{max}}| = k_{\text{П}} N.$$

$$F_{\text{ТР}} = kN,$$

$$F_{\text{С.В.Д.}}^{\text{гр}} = k_{\text{П}} N.$$

$$F_{\text{ТР}} < F_{\text{С.В.Д.}}^{\text{гр}}.$$

ТЕСТ

#### д) Вес и реакция опоры.

*Весом называется сила, с которой тело действует на опору или подвес.*

Вес тела не приложен к телу, а приложен к опоре или подвесу.

Нормальная составляющая силы реакции опоры называется силой нормального давления.

Касательная составляющая силы реакции опоры – есть сила трения.

ТЕСТ

#### ДОПОЛНЕНИЕ

Третий закон Ньютона: Для подавляющего большинства взаимодействий *сила действия равна силе противодействия*.

ПРИМЕР: Если тело действует на опору (с силой, называемой его весом), то опора действует на тело с силой, называемой реакция опоры.

ТЕСТ