

# Лекция 4. Силы в механике.

---

# Виды и категории сил в природе

---

**Сила** — это физическая величина, которая характеризует взаимодействие тел и вызывает изменение их ускорения или деформацию.

Все явления, протекающие во Вселенной, обусловлены четырьмя типами сил или взаимодействий:

- **гравитационные** (проявляются в виде сил всемирного тяготения);
- **электромагнитные** (существование атомов, молекул и макротел);
- **сильные** (ответственны за связь частиц в ядрах);
- **слабые** (ответственны за распад частиц).

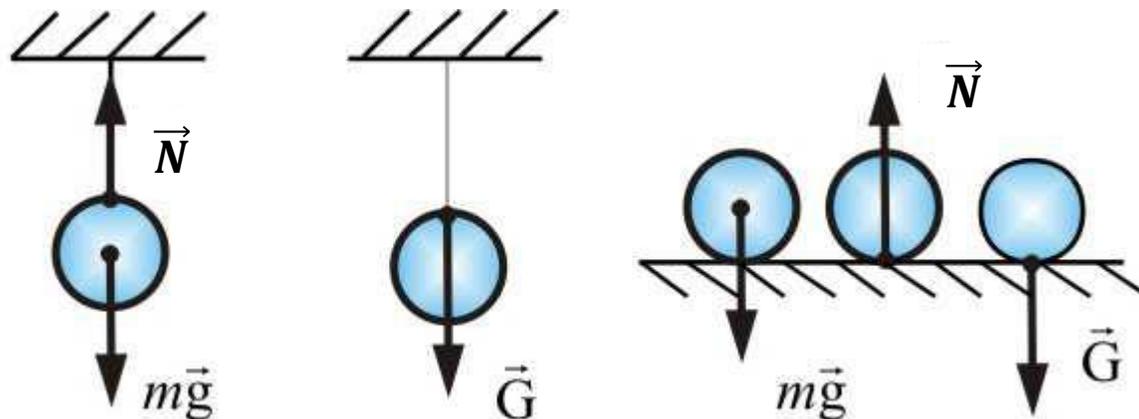
Гравитационные и электромагнитные силы нельзя свести к другим, более простым, силам, поэтому их называют фундаментальными.

# Сила тяжести и вес тела

**Сила гравитации** (проявляется на Земле в виде силы тяжести) – силы, с которой все тела притягиваются к Земле.

В системе отсчета, связанной с Землей, на всякое тело действует сила тяжести  $\vec{g}t$ . Она приблизительно равна силе гравитационного притяжения к Земле.

**Сила реакции опоры (подвеса)  $\vec{N}$**  — это сила, с которой опора (например, поверхность стола, пол или земля) действует на тело, препятствуя его движению вниз под действием силы тяжести. Эта сила возникает как реакция на давление тела на опору и направлена **перпендикулярно поверхности опоры**.



# Сила тяжести и вес тела

**Вес тела  $\vec{G}$**  — это сила, с которой тело действует на опору или подвес под действием гравитации.

Масса — это свойство тела, а вес — это сила, которая зависит от гравитации.

$$m\vec{g} = -\vec{N}$$

Согласно третьему закону Ньютона:  $\vec{G} = -\vec{N}$ , тогда  $\vec{G} = \vec{m}g$

Справедливо при условии покоя относительно земли/равномерного прямолинейного движения.

Вес и сила тяжести равны друг другу, но приложены к разным точкам: вес — к подвесу или опоре, сила тяжести — к самому телу.

Если движение с ускорением, то  $G = mg \pm ma = m(g \pm a)$ .

# Сила тяжести и вес тела

---

Вес тела может быть больше или меньше силы тяжести:

если  $g$  и  $a$  направлены в одну сторону (тело движется вниз или падает), то  $\vec{G} < m\vec{g}$ ,

если наоборот, то  $\vec{G} > m\vec{g}$ .

Если же тело движется с ускорением  $\vec{a} = \vec{g}$ , то  $\vec{G} = 0$ , т. е. наступает состояние невесомости.

# Упругие силы. Механические свойства твердых тел

---

**Деформация** — это изменение формы или размеров тела под действием внешних сил.

Деформация может быть временной (упругой) или постоянной (пластической), в зависимости от свойств материала и величины приложенной силы.

**Упругая деформация** – после прекращения действия внешних сил восстанавливаются прежние форма и размеры тела.

**Предел упругости** — это максимальное напряжение (или сила), при котором материал сохраняет способность возвращаться к своей исходной форме после прекращения действия внешней нагрузки. Если напряжение превышает предел упругости, материал начинает деформироваться пластически (необратимо).

# Упругие силы. Механические свойства твердых тел

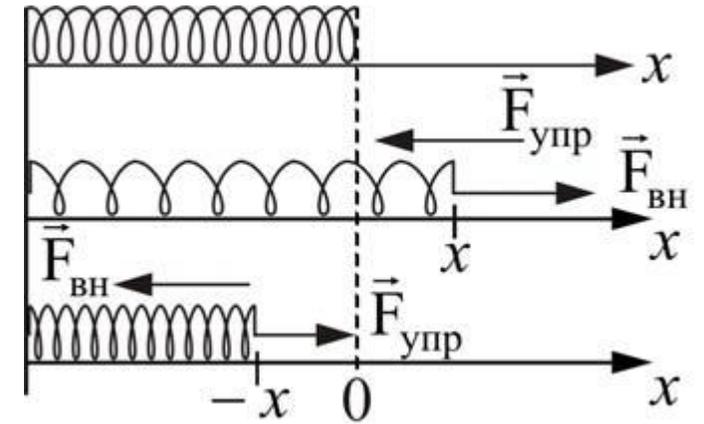
$F_{\text{вн}}$  – внешние силы

$x$  – удлинение,

$F_{\text{упр}}$  – упругая сила,

$$F_{\text{упр}} = -F_{\text{вн}}.$$

В деформированном теле возникают упругие силы, уравнивающие внешние силы.



Любая часть пружины действует на другую часть с силой упругости  $F_{\text{упр}}$ .

Удлинение пружины пропорционально внешней силе.

**Закон Гука** – сила упругости, возникающая при деформации тела, пропорциональна величине деформации и направлена в сторону, противоположную направлению смещения частиц тела при деформации.

# Упругие силы. Механические свойства твердых тел

Удлинение пружины пропорционально внешней силе

$$x = \frac{1}{k} F_{\text{вн}}, \text{ или } x = -\frac{1}{k} F_{\text{упр}}, \quad \text{где } k \text{ – жесткость пружины}$$

Математическая запись Закона Гука:

$$F_{\text{упр}} = -kx.$$

Элементарная работа, совершенная пружиной  $dA = Fdx$

$$dA = -kx dx, \quad A = \int dA = -\int_0^x kx dx = -\frac{kx^2}{2}.$$

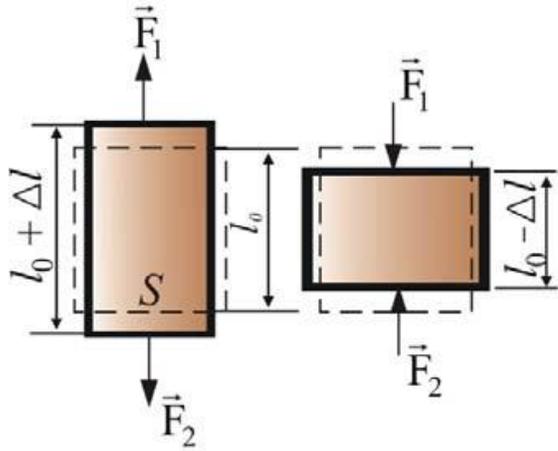
Полная работа, которая совершена пружиной, равна

$$A = -\frac{kx^2}{2}.$$

# Закон Гука для стержня

**Напряжение в стержне**  $\sigma$  — это мера внутренних сил (упругих), возникающих в материале стержня под действием внешней нагрузки.

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}, \quad \text{где } S \text{ — площадь поперечного сечения стержня.}$$



приращение длины стержня  $\Delta l$  пропорционально напряжению  $\sigma$ :

$$\Delta l = \sigma/k. \quad k \text{ — коэффициент пропорциональности, как и в случае пружины, зависит от свойств материала и длины стержня.}$$

Экспериментально доказано  $k = E/l_0$

**Модуль Юнга (или модуль упругости)**  $E$  — это физическая величина, которая характеризует способность материала сопротивляться упругой деформации при растяжении или сжатии.

Модуль Юнга является одной из ключевых характеристик механических свойств материалов.

$$k = E/l_0$$

# Закон Гука для стержня

Тогда :  $\Delta l = l_0 \sigma / E$ , обозначим  $\Delta l / l_0 = \varepsilon$  где  $\varepsilon$  – относительное продольное растяжение/сжатие

**Закон Гука для стержня:** относительное приращение длины стержня прямо пропорционально напряжению и обратно пропорционально модулю Юнга.

$$\varepsilon = \sigma / E .$$

$\varepsilon' = \Delta d / d_0$  – относительное поперечное растяжение (сжатие),

где  $d_0$  и  $d$  – поперечные размеры тела.

**Коэффициентом Пуассона:**  $\mu = \varepsilon' / \varepsilon .$

# Закон Гука для стержня

**Потенциальная энергия упруго растянутого (или сжатого) стержня** — это энергия, которая накапливается в стержне при его деформации.

$$E_{\text{п}} = \int_0^{\Delta l} F dx = \frac{1}{2} \frac{ES}{l} (\Delta l)^2 = \frac{E\varepsilon}{2} V, \quad \text{где } V \text{ — объем стержня}$$

**Объемная плотность потенциальной энергии**  $\omega_{\sigma}$  — это энергия упругой деформации, накопленная в единице объема материала. Она характеризует, сколько энергии запасается в материале при его деформации.

$$w_{\sigma} = A_{\text{упр}} = \frac{\sigma^2}{2E}.$$

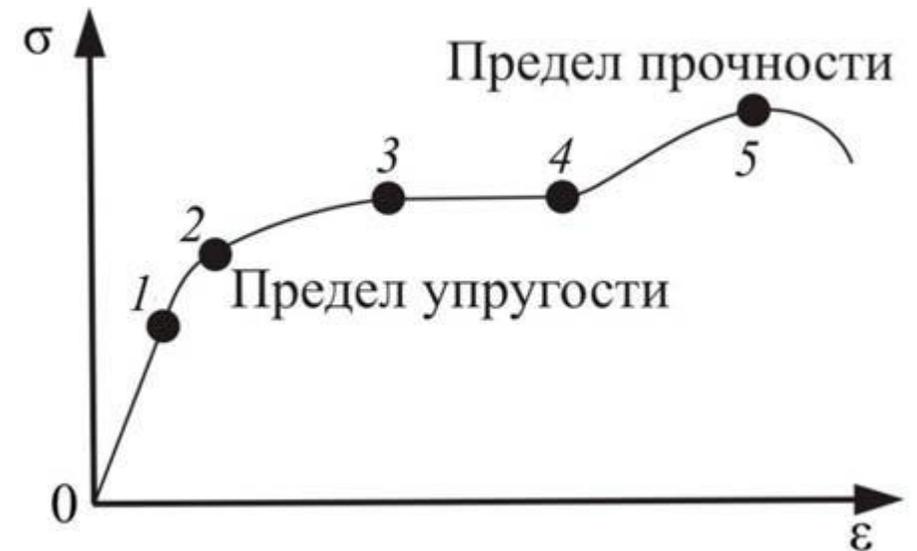
# Диаграмма деформации

**Диаграмма деформации** — это график, который показывает зависимость между механическим напряжением  $\sigma$  и относительной деформацией  $\varepsilon$  материала при его растяжении или сжатии.

**Предел упругости** — это важная характеристика материала, которая используется в инженерных расчетах для определения допустимых нагрузок на конструкции. Если напряжение в материале превышает предел упругости, это может привести к необратимой деформации или разрушению.

**Предел прочности (или временное сопротивление)** — это максимальное напряжение, которое материал может выдержать перед разрушением.

Это важная характеристика, которая показывает, насколько материал устойчив к разрушению под действием внешних нагрузок.



# Диаграмма деформации

0–1 упругие деформации подчиняются закону Гука  $\sigma = E\varepsilon = E\Delta l/l$ .

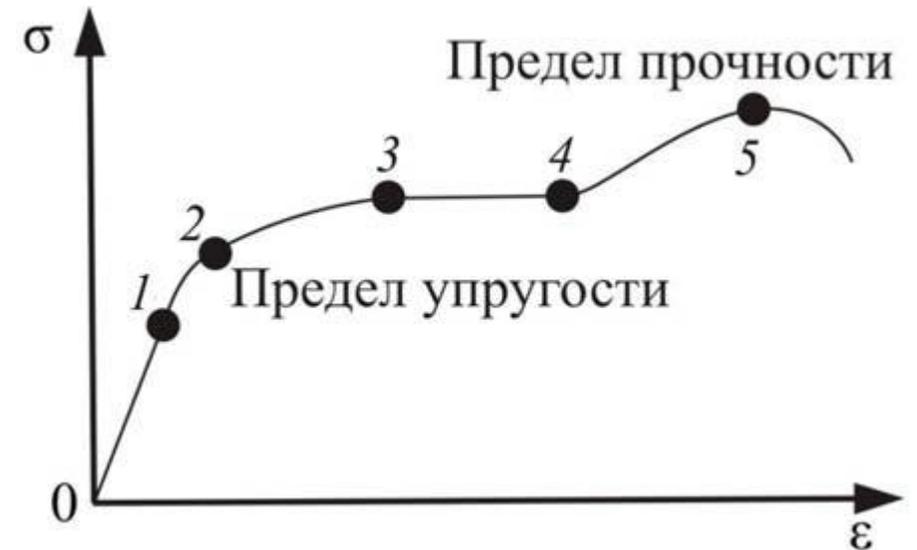
2 - пределу упругости,

2-3 – остаточные деформации (это необратимые изменения формы или размеров тела, которые сохраняются после прекращения действия внешних сил).

3 – предел текучести (начало необратимой деформации),

3 – 4 удлинение деформированного тела без увеличения внешней нагрузки (при каком напряжении материал переходит от упругой деформации к пластической),

5 - наибольшее напряжение, которое выдерживает тело, не разрушаясь, называется пределом прочности.



**Запас прочности:**  $\sigma_{\text{проч}} / \sigma_{\text{доп}} = n$ , где  $\sigma_{\text{проч}}$  – предел прочности материала;  
 $\sigma_{\text{доп}}$  – допустимое напряжение.

# Силы трения

---

**Сила трения** – сила, которая возникает при движении одного тела по поверхности другого.

Сила трения прямо пропорциональна силе нормального давления на трущиеся поверхности и зависит от свойств этих поверхностей.

Существуют **внешнее и внутреннее трение**:

**Внешнее трение** возникает при относительном перемещении двух соприкасающихся твердых тел (трение скольжения или трение покоя).

**Внутреннее трение** наблюдается при относительном перемещении частей одного и того же сплошного тела (жидкость или газ). Различают сухое и жидкое (или вязкое) трение.

**Сухое трение** возникает между поверхностями твердых тел в отсутствие смазки.

**Жидким (вязким)** называется трение между твердым телом и жидкой или газообразной средой или ее слоями.

Сухое трение, в свою очередь, подразделяется на трение скольжения и трение качения.

Рассмотрим законы сухого трения!

# Силы трения

Подействуем на тело, лежащее на неподвижной плоскости, внешней силой  $\vec{F}_{\text{дв}}$ . Внешняя сила уравнивается силой  $\vec{F}_{\text{тр}}$ .

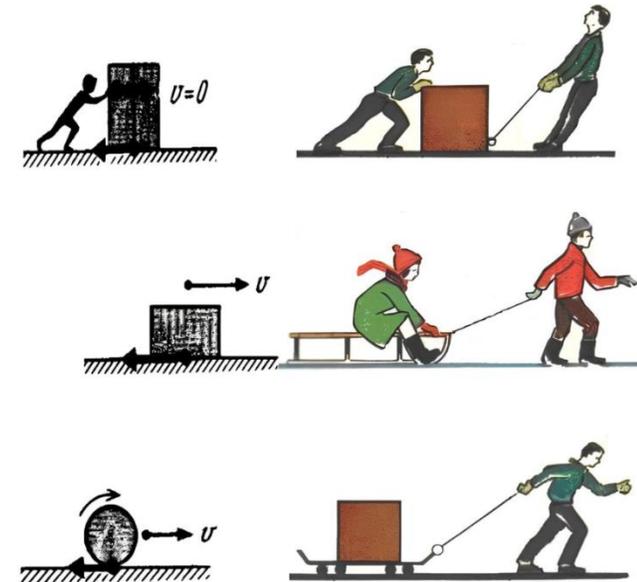
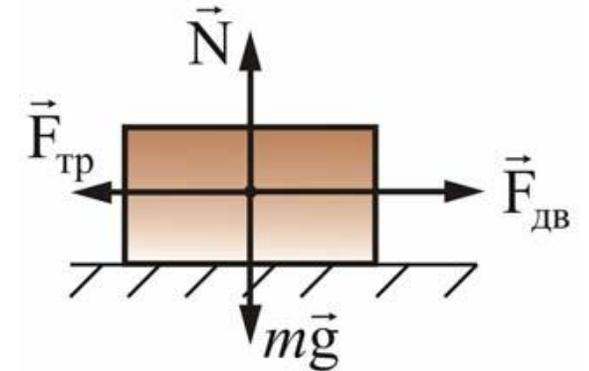
В этом случае  $\vec{F}_{\text{тр}}$  – есть **сила трения покоя**.

Максимальная сила трения покоя  $F_{\text{тр.пок}} = \mu_0 N$ ,

$\mu_0$  – коэффициент трения покоя.

Когда модуль внешней силы, а следовательно и модуль силы трения покоя превысит значение  $\vec{F}_0$ , тело начнет скользить по опоре – трение покоя  $\vec{F}_{\text{тр.п}}$  сменится **трением скольжения**  $\vec{F}_{\text{тр.ск}}$ , где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения.

$\vec{F}_0$  — это максимальное значение силы трения покоя, которое возникает, когда тело еще не движется, но находится на грани начала движения.



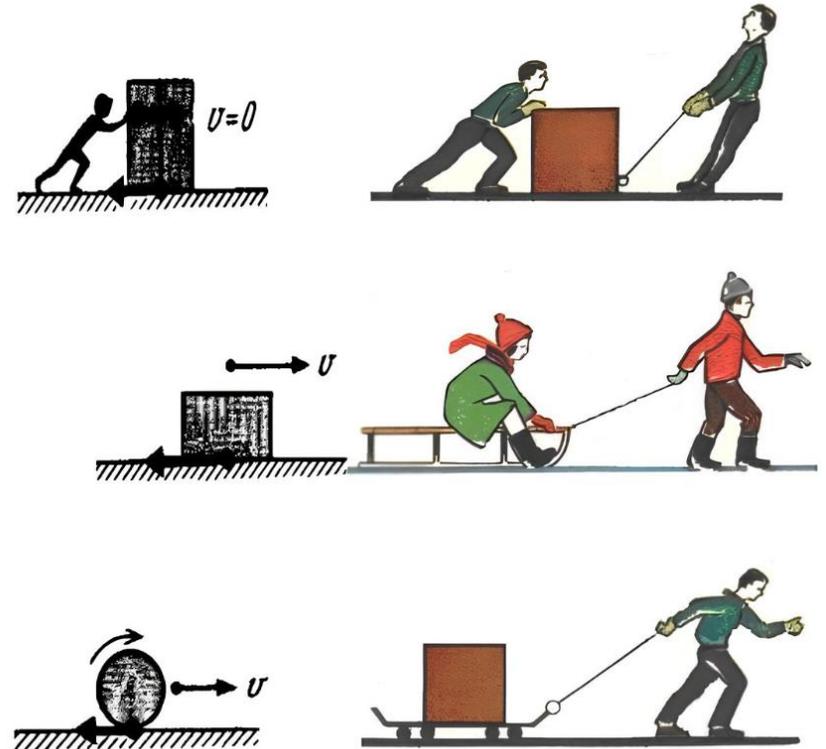
# Силы трения

**Трение качения** возникает между шарообразным телом и поверхностью, по которой оно катится.

Сила трения качения подчиняется тем же законам, что и сила трения скольжения, но коэффициент трения  $\mu$  здесь значительно меньше.

$$F_{\text{тр}} = \mu N / R,$$

где  $R$  – радиус катящегося тела.



# Силы трения

Рассмотрим силу трения скольжения на наклонной плоскости.

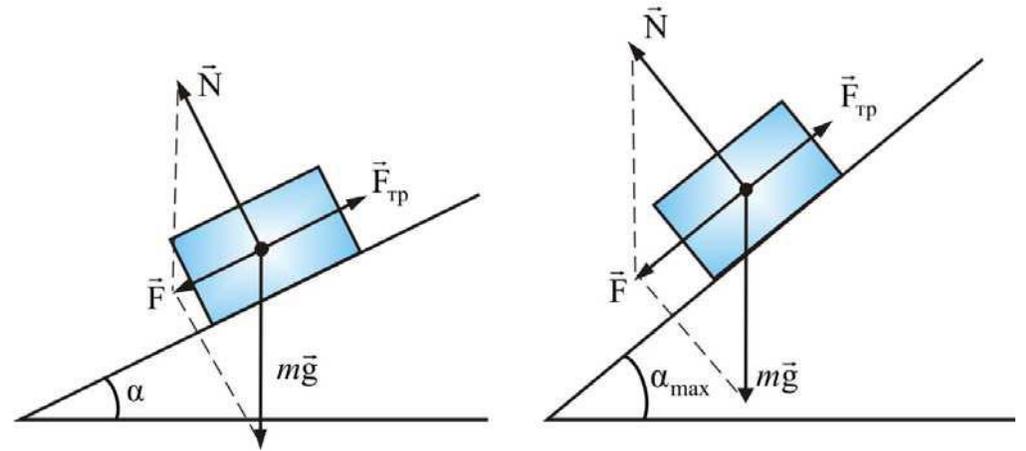
На тело, находящееся на наклонной плоскости с сухим трением, действуют три силы:  $m\vec{g}$ ,  $\vec{N}$ ,  $\vec{F}_{\text{тр}}$ .

$\vec{F}$  – равнодействующая всех сил действующих на тело.

Из рисунка видно:  $F = mg \sin \alpha$ ,  $N = mg \cos \alpha$ .

Если  $F < (F_{\text{тр}})_{\text{max}} = \mu N$ , тело остается неподвижным на наклонной плоскости. Максимальный угол наклона  $\alpha$  определяется из условия  $(F_{\text{тр}})_{\text{max}} = F$  или  $\mu mg \cos \alpha = mg \sin \alpha$ ,

следовательно,  $\text{tg} \alpha_{\text{max}} = \mu$ , где  $\mu$  – коэффициент сухого трения;



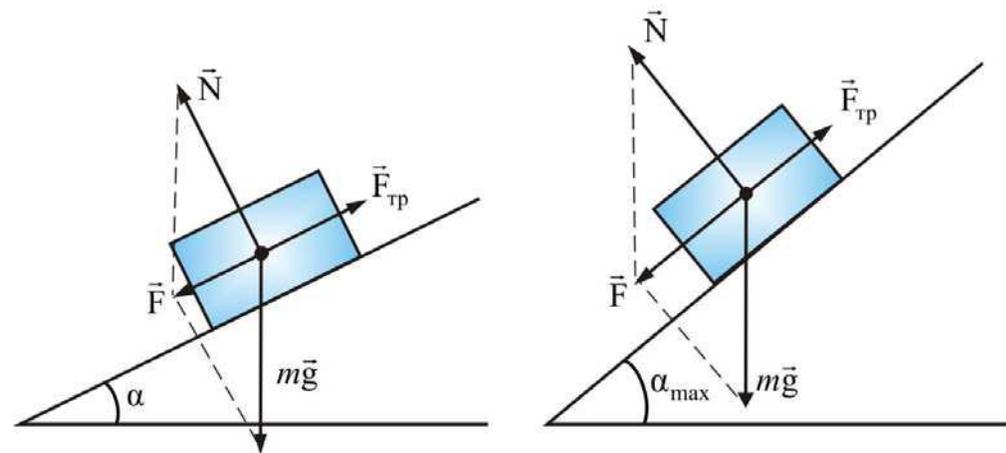
# Силы трения

$$F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg \cos \alpha, \quad F = mg \sin \alpha.$$

$\alpha > \alpha_{\text{max}}$  тело будет скатываться с ускорением

$$a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha);$$

$$F_{\text{ск}} = ma = F - F_{\text{тр}}.$$



# Силы трения

---

## Физический смысл:

Сила трения покоя предотвращает начало движения тела. Сила трения скольжения препятствует движению тела, когда оно уже скользит.

$$F_{\text{тр}} = \mu N$$