

Лекция 02. Первый закон Ньютона  
Взаимодействия и силы в природе. Масса. Второй  
закон Ньютона как основной закон динамики.  
Третий закон Ньютона

Штыгашев А.А.

Новосибирск, НГТУ



Основные законы динамики были впервые сформулированы И. Ньютоном в его фундаментальном трактате «Математические начала натуральной философии» в 1686 году.

Механика Ньютона строится на основе системы аксиом, называемых законами Ньютона, которые обобщают установленные опытом факты с использованием исходных фундаментальных понятий силы и массы.

**Динамика** - это раздел механики, посвященный изучению движения материальных тел под действием приложенных к ним **сил**.

**Сила** - это физическая величина, являющаяся количественной мерой механического **взаимодействия** материальных тел.

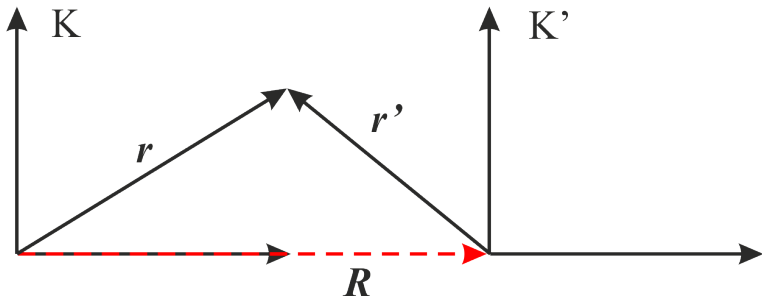
Результатом действия силы на тело являются а) возникновение или изменение состояния движения тела (т.е. ускорения ) и/или б) деформация тела.

**Взаимодействие** тел есть взаимное влияние тел на движение каждого из них.

# Инерциальные и неинерциальные системы отсчета

Рассмотрим две системы отсчета  $K$  и  $K'$  и пусть система  $K'$  движется со скоростью  $V$  относительно системы  $K$ .

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{R} \quad (1)$$



Закон сложения скоростей

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{V} \quad (2)$$

Последнее выражение дифференцируем по времени, тогда

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}' + \mathbf{A} \quad (3)$$

согласно которому, ускорение тела в системе отсчета  $K$  вызвано ускорением тела в системе  $K'$  и ускоренным движением самой системы  $K'$  относительно системы отсчета  $K$ .

Все системы отсчета разделяются на

- инерциальные (ИСО)
- неинерциальные (НИСО)

Ускорение тела во всех **инерциальных системах отсчета** будет иметь одно и то же значение.

Понятие инерциальной системы отсчета является идеализацией, которая всегда лишь приближенно применима к системам реальных тел отсчета.

# Первый закон Ньютона (закон инерции)

Утверждение о существовании ИСО И.Ньютон сформулировал в виде первого закона динамики.

**Первый закон Ньютона (закон инерции Галилея-Ньютона).** Всякое тело находится в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока воздействие со стороны других тел не заставит изменить это состояние.

Первый закон Ньютона выполняется **не во всех** системах отсчета.

Системы, в которых выполняется этот закон, называются **инерциальными системами отсчета (ИСО)**.

Система отсчета, центр которой совмещен с центром Солнца, а оси направлены на специально выбранные «неподвижные звезды» с высокой степени точности является ИСО (гелиоцентрическая система отсчета).



Система отсчета, связанная с Землей (которая движется вокруг Солнца с ускорением и вращается вокруг своей оси) - неинерциальная система отсчета (НИСО), однако ускорение Земли мало и в большинстве случаев этим ускорением можно пренебречь, считая систему отсчета, связанную с Землей, ИСО.

# Принцип относительности Галилея

Для ИСО Галилей сформулировал принцип относительности:

Все ИСО по своим механическим свойствам **эквивалентны** друг другу.

Это означает, что никакими **механическими** опытами, проводимыми в ИСО, нельзя установить движется ИСО или находится в покое.

Согласно первому закону Ньютона в ИСО только **внешнее воздействие** может вызвать **ускоренное** движение тела.

Опыт показывает, что всякое тело оказывает сопротивление при любом воздействии. Это свойство называют **инертностью** тела.

**Инертность** – свойство материального тела, проявляющаяся в том, что тело сохраняет неизменным состояние своего движения или покоя по отношению к ИСО когда внешние силы отсутствуют или взаимно компенсируются.

# Инертность. Масса

В случае ненулевой силы действующей на тело свойство инертности проявляется в том, что изменение состояния тела происходит не мгновенно, при этом движение изменяется тем медленней, чем больше инертность тела.

Мерой инертности тела является масса.

**Масса** – фундаментальная физическая величина, определяющая инерционные и гравитационные свойства тел.

**Масса – это количественная мера инертности.**

Измеряется масса в СИ в килограммах (кг)

Размерность массы обозначается  $[m] = M$ .

# Резюме по массе

Масса - скалярная физическая величина  $m$ , количественно характеризующая свойства тела:

- сохранять или изменять состояния движения тела под действием силы (инерционные свойства тела), такая масса называется инертной массой  $m_i$ , она проявляется как коэффициент между действующей на тело силой и вызываемым ускорением  $a$
- способность вступать в гравитационные взаимодействия, определяя интенсивность таких взаимодействий тела, такая масса называется гравитационной массой  $m_g$  (гравитационный заряд).

Эксперимент не позволяет обнаружить количественное отличие этих двух масс любого тела. Этот опытный факт положен в основу ОТО как **принцип эквивалентности инертной и гравитационной массы**, полагая справедливым тождество  $m_i = m_g$ .

# Импульс тела

Импульс (количество движения) есть мера механического движения, представляющая собой векторную величину, равную для материальной точки произведению массы тела на ее скорость

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} \quad (4)$$

## Второй закон Ньютона

Скорость изменения импульса тела равна действующей на тело силе  $\mathbf{F}$

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} \quad (5)$$



## Второй закон Ньютона

Если масса тела не изменяется, то второй закон принимает вид

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} \quad (6)$$

Под действием силы  $\mathbf{F}$  тело постоянной массы  $m$  приобретает ускорение  $\mathbf{a}$  (относительно ИСО), которое пропорционально силе и обратно пропорционально массе

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} \quad (7)$$

здесь  $\mathbf{F}$  - сумма всех сил, действующих на тело.

Сила измеряется в ньютонах:  $1\text{Н}=1\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$ ,  
размерность силы:  $[F]=\text{MLT}^{-2}$ , в такой нотации:

M - размерность массы,

L – размерность длины,

T – размерность времени.

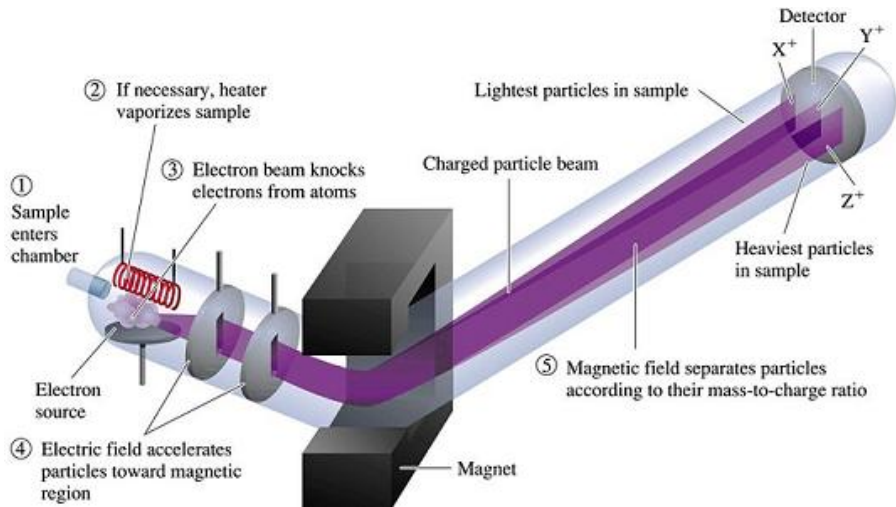
Измерение массы может основываться на сравнении ускорений, сообщаемых данному телу и эталону одной и той же силой, тогда из отношения

$$m_1 a_1 = m_2 a_2,$$

следует

$$m_2 = m_1 (a_1 / a_2).$$

Такое динамическое измерение используется для измерения массы атомов в масс-спектрометрах, принцип действия которых основан на отклонении пучков ионов силовым полем.



Массу макроскопического тела измеряют **взвешиванием**, т.е. сравнением силы тяготения действующей на тело с аналогичной силой, действующей на эталонное тело (гирю).



**Сила** – величина, являющаяся мерой механического действия на материальное тело со стороны других тел.

Чтобы измерить силу в механике используют приборы - динамометры.



# Фундаментальные взаимодействия

Сила является проявлением одной из четырех фундаментальных взаимодействий

Таблица: Фундаментальные взаимодействия

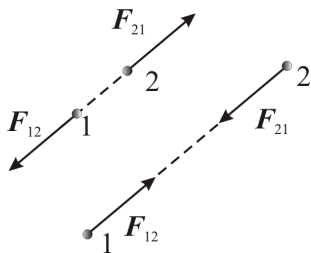
Взаимодействие	Интенс-ть	Радиус, м	Источник
Сильное	1	$10^{-15}$	Нуклоны
Электромагнитное	$1/137$	$\infty$	Электр. заряды
Слабое	$10^{-10}$	$10^{-18}$	Элемен. частицы
Гравитационное	$10^{-38}$	$\infty$	Массы

Все изучаемые в механике силы имеют гравитационную и электромагнитную природу:

- 1. Сила тяготения (гравитационное взаимодействие)
- 2. Сила тяжести (гравитационное взаимодействие)
- 3. Сила реакции опоры (электромагнитное взаимодействие)
- 4. Сила упругости (электромагнитное взаимодействие)
- 5. Сила трения (электромагнитное взаимодействие)



## Третий закон Ньютона



Силы, с которыми действуют друг на друга взаимодействующие тела, равны по величине и противоположны по направлению.

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$$

Третий закон Ньютона справедлив только для взаимодействия покоящихся тел или для контактных взаимодействий.

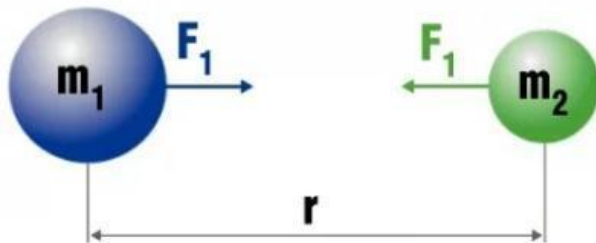
Примечание: Так как эти силы приложены к **разным** телам, поэтому **их нельзя складывать**.

# Закон всемирного тяготения

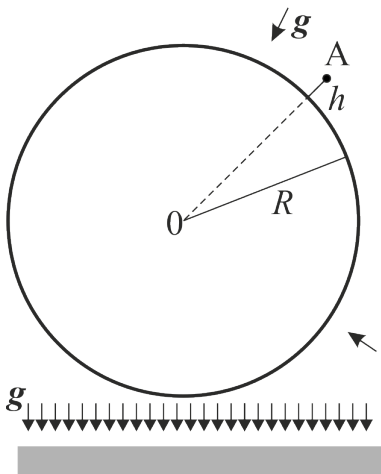
Сила тяготения

$$\mathbf{F} = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \mathbf{e}_r, \quad \mathbf{e}_r = \frac{\mathbf{r}}{r} \quad (8)$$

где  $\gamma = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2/\text{с}^2$  гравитационная постоянная.



# Сила тяжести



Рассмотрим случай, когда масса первого тела  $m_1$  много больше массы второго тела  $m_2$  и второе тело находится вблизи первого, т.е.  $r = R + h$ , причем  $R \gg h$  и  $m_1 = M$  и  $m_2 = m$ , тогда из (8) получаем

$$\mathbf{F} = -m\gamma \frac{M}{R^2} \frac{1}{1 + (h/R)^2} \mathbf{e}_r \approx m\mathbf{g}, \quad (9)$$

$$\mathbf{g} = -\gamma \frac{M}{R^2} \mathbf{e}_r \quad (10)$$

$$\mathbf{F} = m\mathbf{g}. \quad (11)$$

Если первое тело - наша планета: радиус Земли 6380 км, а высота  $h$  какого-нибудь тела меньше 10 км, то  $R \gg h$ , поле тяжести Земли **однородно** и  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$  - ускорение свободного падения на Земле.

Земля	9,81 м/с <sup>2</sup>	1,00 g	Солнце	273,1 м/с <sup>2</sup>	27,85 g
Луна	1,62 м/с <sup>2</sup>	0,165 g	Марс	3,86 м/с <sup>2</sup>	0,394 g

# Сила упругости

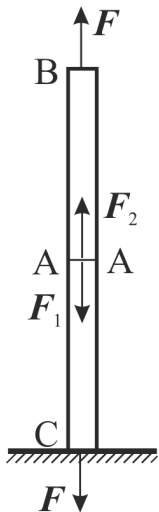
Реальные тела деформируемы, т.е. под действием приложенных сил тела изменяют форму или объем.

Эти изменения называют **деформациями**.

Для твердых тел различают два предельных случая:

- 1. упругие деформации;
- 2. пластические деформации.

**Упругими** называются деформации, исчезающие после прекращения действия приложенных сил, в противном случае, деформации **пластические (остаточные)**.



Рассмотрим только упругие деформации, используя модель абсолютно-упругого тела, взятого в виде тонкого стержня. В любом сечении А-А для равновесия стержня ВС необходимо, чтобы на нижнее основание сечения А-А действовала сила  $F_1$  и это есть сила с которой часть стержня АС растягивает верхнюю часть стержня АВ, наоборот, верхняя часть АВ стержня растягивает нижнюю часть АС с силой  $F_2$ . При равновесии  $F_1 = F_2$ .

Силу, отнесенную к единице площади поперечного сечения стержня, называют **напряжением**  $T$ .

- 1. Если стержень растянут, то это напряжение называют **натяжением**  $T$

$$T = \frac{F}{S}. \quad (12)$$

- Если стержень сжат, то напряжение называют **давлением**  $P$ :

$$P = \frac{F}{S}. \quad (13)$$

(давление можно рассматривать как отрицательное натяжение)

Пусть  $l_0$  - длина недеформированного стержня,  $l$  - длина деформированного стержня:  $l = l_0 + \Delta l$ , тогда введем обозначение относительного удлинения (сжатия) стержня, характеризующее деформацию

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (14)$$

Закон Гука: Натяжение (давление) пропорционально относительному удлинению (сжатию)

$$T = E \frac{\Delta l}{l_0}, \quad P = -E \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (15)$$

где  $E$  - модуль упругости Юнга (1773-1829).



Перепишем закон в виде

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l_0}, \rightarrow F = \left( E \frac{S}{l_0} \right) \Delta l \rightarrow F = k \Delta l, \quad k = E \frac{S}{l_0} \quad (16)$$

В более привычном виде

$$F = -k \Delta l. \quad (17)$$

Знак минус указывает, что при деформации сила упругости направлена в противоположную сторону деформации. (Роберт Гук открыл этот закон в 1660 году)

## ВЕС тела

**Вес** - сила , с которой любое тело, находящееся в поле силы тяготения, действует на опору (подвес), препятствующее свободному падению.

Когда опора (подвес) покоится или движется прямолинейно и равномерно относительно ИСО, вес тела  **$P$**  по величине и направлению совпадает с силой тяжести  **$mg$**

$$P = mg$$

**Вес** и **сила тяжести** приложены к различным объектам:

- вес приложен к опоре(подвесу)
  - сила тяжести приложена к телу
- и имеют разную физическую природу:
- вес** - упругую (электромагнитную);
- сила тяжести** - гравитационную.

Если опора (подвес) или само тело движется с ускорением  $\mathbf{A}$  относительно ИСО, то вес тела равен

$$\mathbf{P} = m(\mathbf{g} - \mathbf{A})$$

Если ускорение  $\mathbf{A}$  совпадает по направлению с силой тяжести  $m\mathbf{g}$ , то вес тела уменьшается, при  $\mathbf{A} = \mathbf{g}$  вес тела равен нулю (невесомость). Если ускорение противоположно силе тяжести, то численно вес тела увеличивается, возникает явление перегрузки.

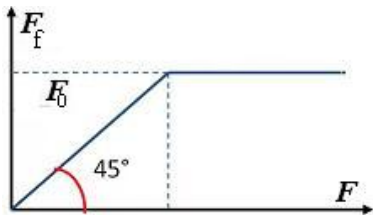
Человек, стоящий неподвижно	1 g
Пассажир в самолете при взлете	1,5 g
Парашютист при приземлении со скоростью 6 м/с	1,8 g
Парашютист при раскрытии парашюта (при изменении скорости от 60 до 5 м/с)	5,0 g
Космонавты при спуске в космическом корабле «Союз»	до 3,0—4,0 g
Летчик при выполнении фигур высшего пилотажа	до 5 g
Летчик при выведении самолета из пикирования	8,0—9 g
Перегрузка (длительная), соответствующая пределу физиологических возможностей человека	8,0—10,0 g
Наибольшая (кратковременная) перегрузка автомобиля, при которой человеку удалось выжить	214 g



# Сила трения

Трение возникает при соприкосновении двух тел. Если на одно из тел действует сила трения, то на другое тело действует такая же по величине, но противоположная по направлению сила трения (третий закон Ньютона). Различают два основных типа трения: внутреннее и внешнее.

- Внутренним трением (вязкостью) называют явление возникновения **касательных (тангенциальных)** сил, препятствующих перемещению частей жидкости или газа друг относительно друга.
- Внешним трением называется взаимодействие между телами, возникающее в местах их соприкосновения и **препятствующее** их относительному перемещению. Внешнее трение между движущимися телами называют кинематическим трением.



Внешнее трение между взаимно неподвижными телами называют трением покоя. Оно проявляется в том, что для возникновения относительного перемещения двух соприкасающихся тел нужно приложить силу  $F$ , так чтобы  $F > F_0$ , где  $F_0$  - предельная сила трения покоя.

Отсутствие взаимного перемещения тел при  $F \leq F_0$  называется **явлением застоя**.

Это явление используется в технике для передачи усилий от одного механизма к другому.



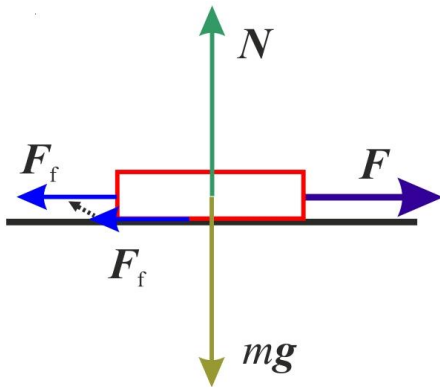




## Передача от турбины к генератору (Чемальская ГЭС)

## Сухое трение

Трение называется сухим, если отсутствует прослойка (смазка) между поверхностями соприкасающихся тел. В случае сухого трения тангенциальная сила трения вызывается механическим зацеплением между неровностями поверхностей тел и сцеплением между молекулами обоих тел в областях непосредственного соприкосновения.



В приближенных расчетах сила трения скольжения прямо пропорциональна силе нормального давления между поверхностями трущихся тел

$$F_f = \mu N. \quad (18)$$

где  $\mu$ -коэффициент трения скольжения - безразмерная физическая величина, определяющая отношение величины силы трения к силе нормального давления, прижимающей трущиеся поверхности друг к другу.

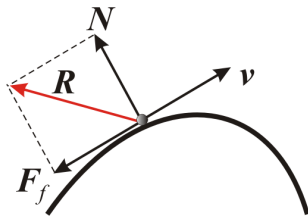
Таблица: Коэффициент трения скольжения  $\mu$

Материалы	$\mu$
Металл по льду	0.018-0.002
Древесина по льду	0.035
Древесина по древесине	0.20-0.50
Металл по металлу	0.15-0.20
Металл по металл при смазке	0.07-0.10
Ремень по чугунному шкиву	0.56
Резина по сухому асфальту	0.50-0.70

## Сила реакции $R$

Сила реакции  $R$  с которой твердая поверхность или кривая действует на движущееся по ней тело направлена под тупым углом к скорости тела обычно раскладывается на две взаимно перпендикулярные компоненты. Компонента, перпендикулярная к скорости тела называется силой нормальной реакции  $N$ , вторая компонента направлена против вектора скорости - сила трения скольжения  $F_f$ , т.е.

$$R = N + F_f$$



# Вязкое (внутреннее) трение

Трение между твердым телом и жидкой (газообразной) средой, а также между слоями жидкой (газообразной) средой называется **жидким** трением.

Вязкое (внутреннее) трение.

Рассмотрим здесь только относительное движение твердого тела в жидкой (газообразной) среде.

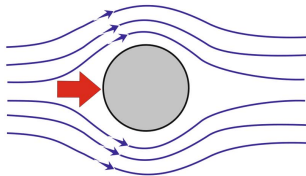
При небольших скоростях, меньших некоторой критической скорости  $v_k$ , сила трения складывается из жидкого трения и сопротивления среды и равна

$$\mathbf{F} = -k_1 \mathbf{v}, \quad v < v_k. \quad (19)$$

где  $k_1$  - коэффициент зависит от свойств среды, формы и размеров тела.

Для тела сферической формы радиуса  $R$ , коэффициент  $k_1$  равен

$$k_1 = 6\pi\eta R \quad (20)$$



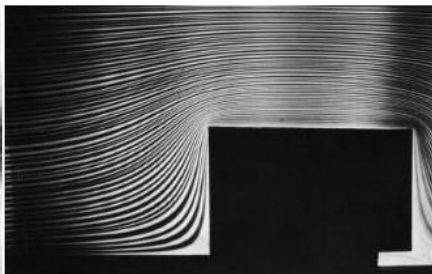
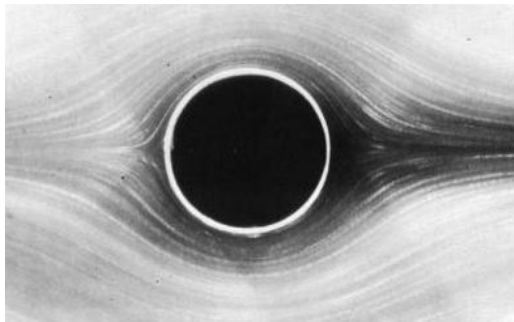
$$\mathbf{F} = -6\pi\eta R\mathbf{v} \quad v < v_k \quad (21)$$

последнее выражение называется законом Стокса, установленным в 1851 году.

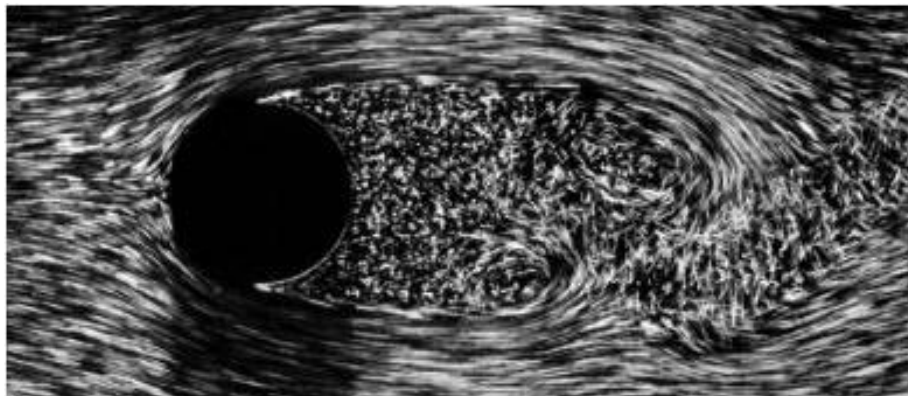
Здесь  $\eta$  - динамической вязкостью среды и применим закон Стокса в случаях **ламинарного** обтекания средой тела.



# Ламинарное обтекание



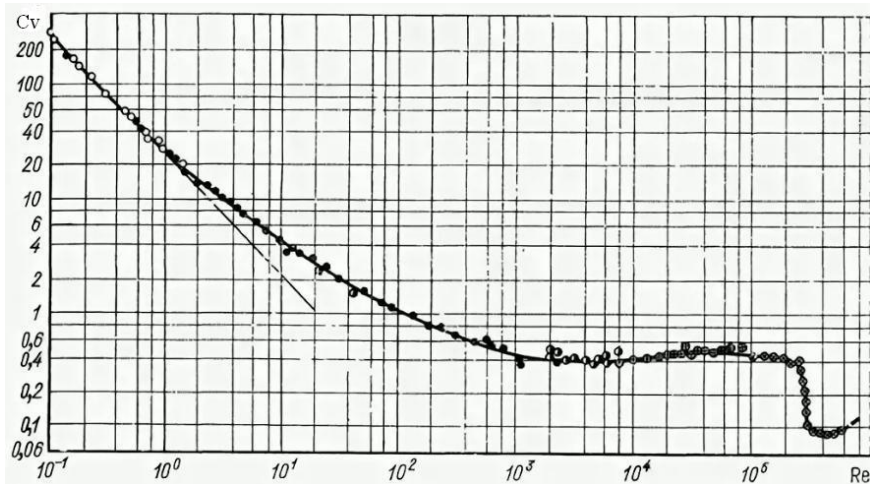
При бОльших относительных скоростях характер обтекания резко усложняется и носит турбулентный характер:



$$\mathbf{F} = -k_2 v^2 \mathbf{e}_v, \quad \mathbf{e}_v = \mathbf{v}/v, \quad v > v_k \quad (22)$$

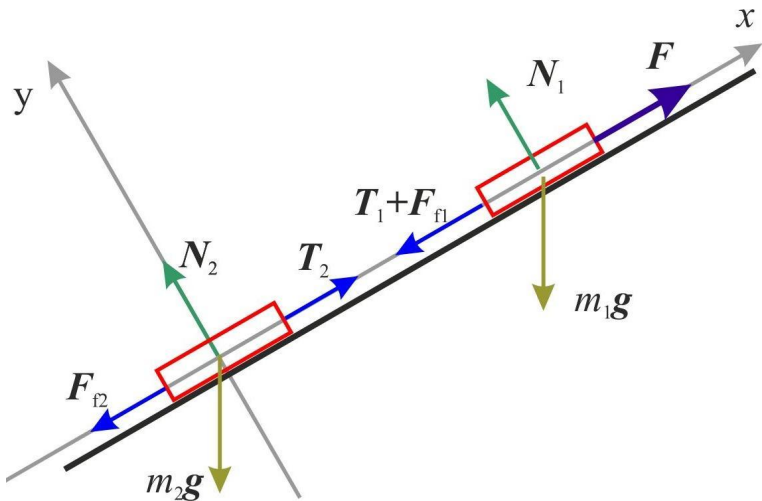
где  $k_2$  - коэффициент зависит от свойства среды, формы и размеров тела. Значение критической скорости  $v_k$  определяется опытным путем.

# Шар в потоке воздуха. Число Рейнольдса $Re = \frac{\rho v D}{\eta}$



## Пример 2.1

Составить уравнения движения для системы тел



$$\begin{cases} m_1 \mathbf{a}_1 = \mathbf{F} + \mathbf{N}_1 + \mathbf{F}_{f1} + \mathbf{T}_1 + m_1 \mathbf{g}, \\ m_2 \mathbf{a}_2 = \mathbf{N}_2 + \mathbf{F}_{f2} + \mathbf{T}_2 + m_2 \mathbf{g}. \end{cases} \quad (23)$$

Проецируем все векторные величины на оси координат:

$$\begin{cases} m_1 a_1 = F - F_{f1} - T_1 - m_1 g \sin \alpha, \\ 0 = N_1 - m_1 g \cos \alpha, \\ m_2 a_2 = -F_{f2} + T_2 - m_2 g \sin \alpha, \\ 0 = N_2 - m_2 g \cos \alpha \end{cases} \quad (24)$$

где  $\alpha$  - угол наклона плоскости к горизонту.

## ТЕСТ 2

Сила  $F$  сообщает телу массой  $m_1$  ускорение  $a_1$ . Эта же сила сообщает телу массой  $m_2$  ускорение  $a_2$ . Телу какой массы эта сила сможет сообщить ускорение  $a_1 + a_2$ ?