ФИЗИКА

Лекция 5

Динамика волнового движения

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Упругие волны

Волновой процесс (волна) – процесс распространения колебаний в среде (волны на поверхности жидкости, упругие волны, электромагнитные волны).

Основное свойство волны:
перенос энергии без переноса вещества, т.к. при распространении волны частицы среды не двигаются вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия.

Упругие (механические) волны – механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде.

Тело называется **упругим**, а его деформации, вызываемые внешними воздействиями, называются упругими деформациями, если они полностью исчезают после прекращения этих воздействий.

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Упругие волны

Газ, жидкость обладают только ***объёмной упругостью***, *т.е. способностью сопротивляться изменению объёма.* Твёрдое тело – ***объёмная упругость*** и ***упругость формы***.

Звуковые (акустические) волны – упругие волны малой интенсивности.

- слышимый звук: $f=16\div 2\cdot 10^4$ Гц
- инфразвук: $f<16$ Гц
- ультразвук: $f>2\cdot 10^4$ Гц
- гиперзвук: $f>10^9$ Гц

Упругие волны

Интенсивность звука (сила звука) – величина, определяемая средней по времени энергией, переносимой звуковой волной в единицу времени сквозь единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны:

$$I = \frac{W}{S \cdot t}, \left[\frac{Вт}{м^2}\right]$$

Физиологический закон Вебера–Фехнера: *с ростом интенсивности звука громкость возрастает по логарифмическому закону.*

По измеренному значению интенсивности звука (объективная характеристика) вводят объективную оценку громкости звука (субъективная характеристика) – ***уровень интенсивности звука***:

$$L = lg\frac{I}{I_0}, [бел = 10\ децибел]$$

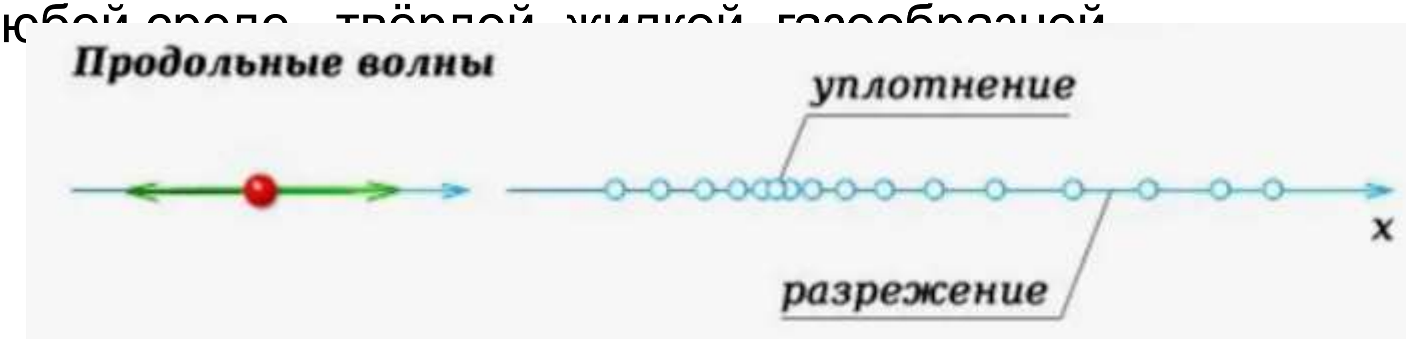
I_0–интенсивность звука на пределе слышимости, I_0=10–12 Вт/м^2.

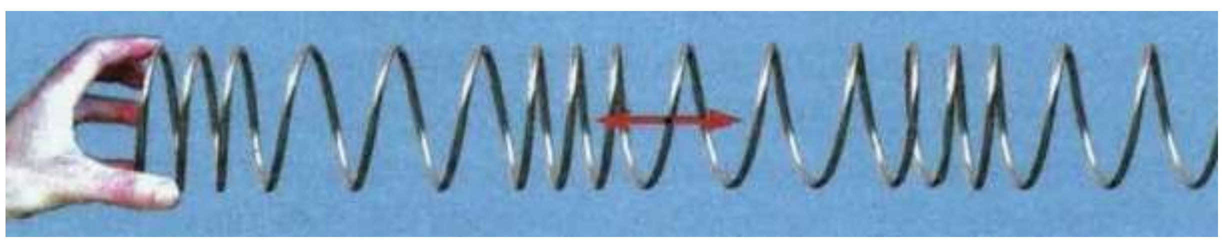
Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Продольные и поперечные волны

Упругая волна называется ***продольной (P-волны)***, если частицы среды колеблются в направлении распространении волны.

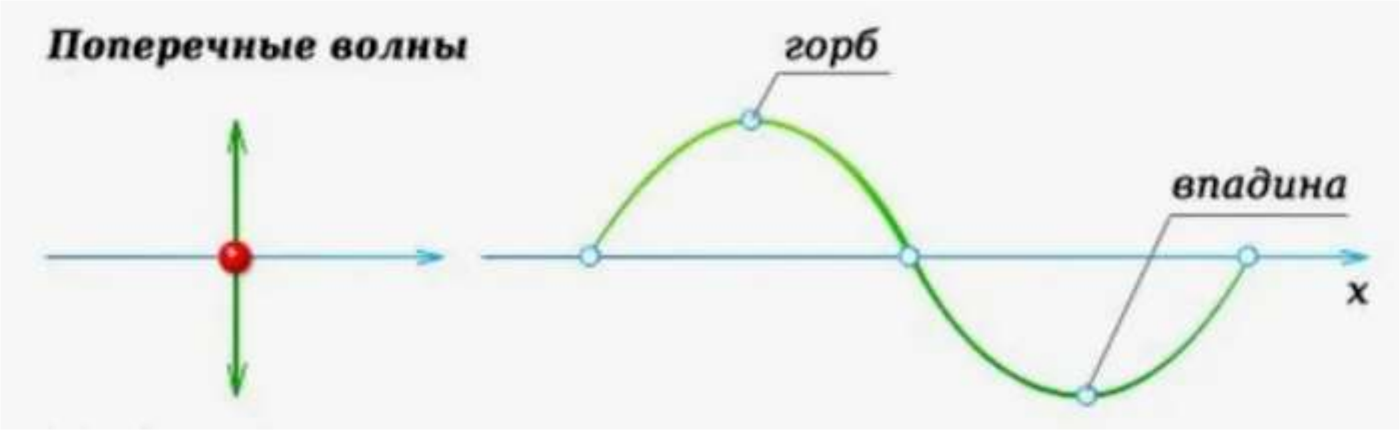
Продольные волны связаны с объёмной деформацией упругой среды, следовательно, могут распространяться в любой среде – твёрдой, жидкой, газообразной.

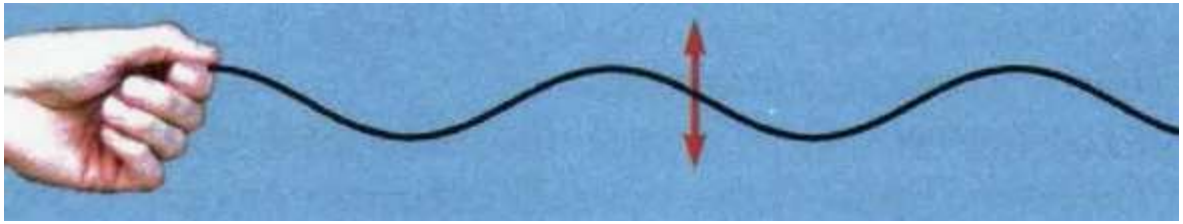




Продольные и поперечные волны

Упругая волна называется ***поперечной (s-волны)***, если частицы среды колеблются, оставаясь в плоскостях, перпендикулярных к направлению распространения волн. Они связаны с деформацией сдвига упругой среды, следовательно, распространяются в средах, обладающих упругостью формы, т.е. твёрдых телах.

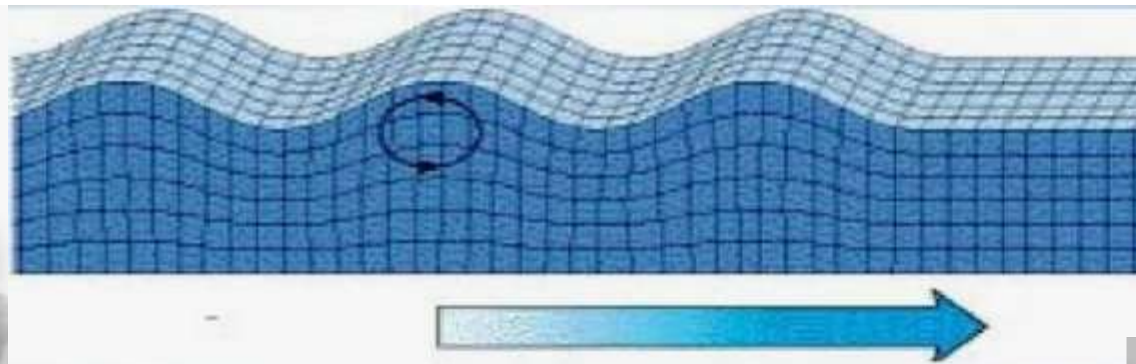


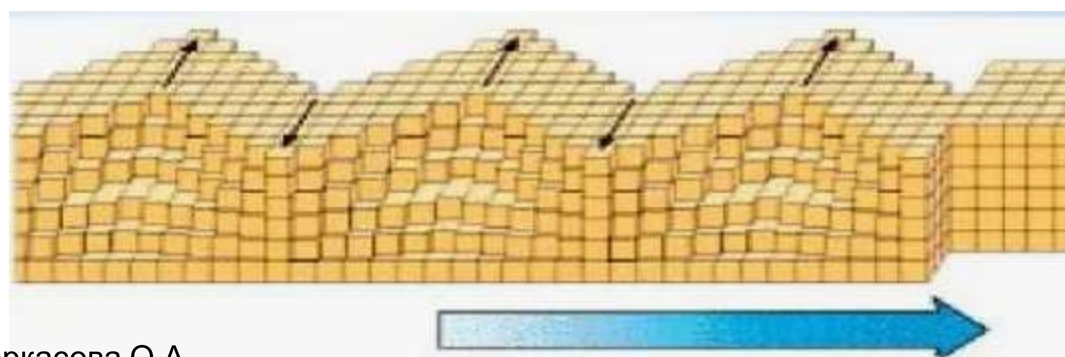


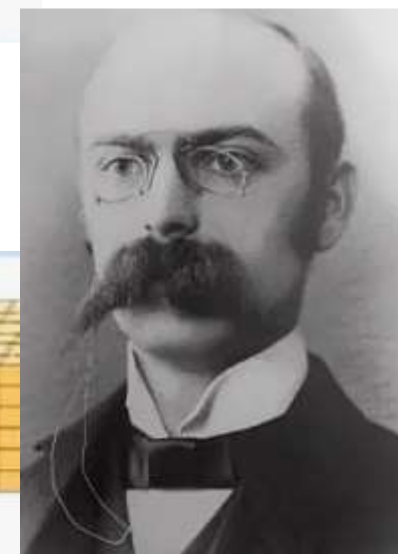
Продольные и поперечные волны

Поверхностные волны (волны Рэлея и Лава) – волны, распространяющиеся вдоль свободной поверхности. Возмущения этой поверхности возникают под влиянием внешних воздействий.

Джон Уильям Стретт (лорд Рэлей)
1842-1919







Огастес Эдвард Хаф Лав
(1863-1940)

Бегущая волна

Бегущая волна – *волна,* которая в отличие от стоячих волн, переносит энергию в пространстве.
Луч – линия, касательная к которой в каждой её точке совпадает с направлением распространения волны.
Уравнение упругой волны – зависимость от координаты и времени скалярных или векторных величин, характеризующих колебания среды при прохождении в ней волны.

Механические возмущения распространяются в упругой среде с конечной скоростью *v.* Поэтому возмущение достигает произвольной точки среды через время

$$\Delta t = \frac{l}{\upsilon},$$

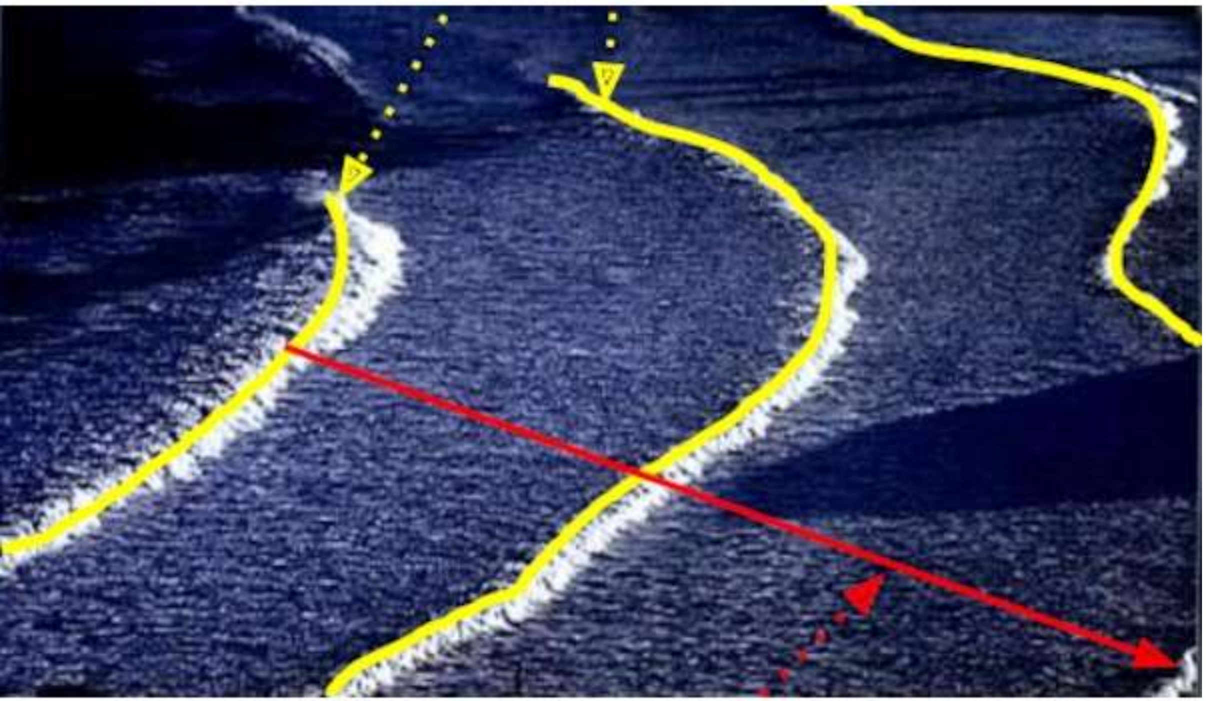
где *l* – расстояние от источника волны до точки.
Следовательно, колебания в точке отстают по фазе от колебаний источника волн.

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Бегущая волна

Волновой фронт – геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t.
Волновая поверхность – геометрическое место точек, в которых фаза колебаний имеет одно и то же значение (в простейшем случае плоская или сферическая).

Фронт волны



Волновой луч - перпендикулярен фронту волны

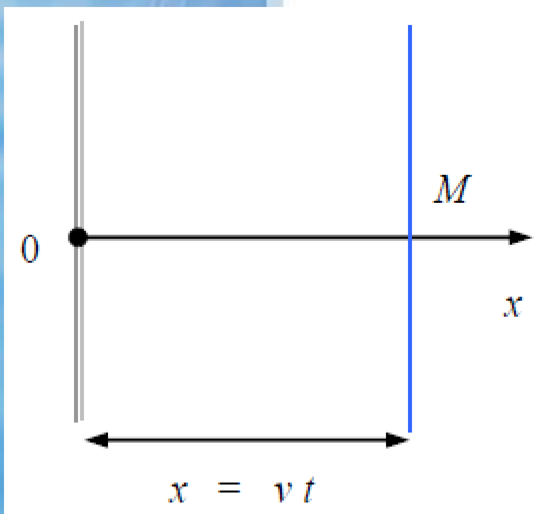
В однородной изотропной среде волновые поверхности ортогональны лучам.

Волна называется ***плоской***, если её волновые поверхности представляют совокупность плоскостей, параллельных друг другу.

Плоская волна

Пусть плоская волна распространяется вдоль оси *x*, поглощения нет.

Величина *S*, характеризующая колебательное движение среды, зависит только от времени *t* и координаты x.



Колебания в точке М отличаются от колебаний в точке 0 только тем, что они сдвинуты по времени на *x/v*.

Следовательно, S является функцией (t–x/v) и **уравнение плоской волны**, распространяющейся вдоль x, принимает вид:

$$S = f\left(t \pm \frac{x}{\upsilon}\right)$$

Упругая волна называется ***гармонической***, если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими.

Плоская волна

Кинематическое уравнение плоской гармонической волны, распространяющейся вдоль + *x и - x:*

$$S(t,x) = A\sin\omega(t - \frac{x}{\upsilon}) \quad S(t,x) = A\sin\omega(t + \frac{x}{\upsilon})$$

$$\Downarrow$$

Продифференцируем дважды и приравняем вторые производные

$$\frac{\partial^2 S(t,x)}{\partial t^2} - \upsilon^2 \frac{\partial^2 S(t,x)}{\partial x^2} = 0 \Rightarrow$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 S(t,x)}{\partial x^2} - \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2 S(t,x)}{\partial t^2} = 0}$$

волновое уравнение в канонической форме

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = \Delta S - \text{оператор Лапласа}$$

$$\boxed{\Delta S(t,x,y,z) - \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2 S(t,x,y,z)}{\partial t^2} = 0}$$

Плоская волна

Расстояние на которое распространяется волна за время равное периоду *T, называется* ***длиной волны*** $\lambda = \upsilon T$ – расстояние между ближайшими точками, колеблющимися в одной фазе.

Упругая волна называется ***гармонической***, если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими.

Упругая среда, в которой распространяется механическая волна, обладает как энергией колебательного движения частиц, так и потенциальной энергией, обусловленной деформацией. Объёмная плотность кинетической и потенциальной энергии запишем в виде:

$$\omega_{к} = \frac{dE_{к}}{dt} = \frac{1}{2}\rho\upsilon^2 = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{\partial S}{\partial t}\right)^2$$

$$\omega_{п} = \frac{dE_{п}}{dt} = \frac{1}{2}E\varepsilon^2 = \frac{\rho\upsilon^2}{2}\left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2$$

где E - модуль Юнга,
ρ – плотность среды,
ε – относительное удлинение (деформация)

Плоская волна

Объёмная плотность энергии плоской волны:

$$\omega = \omega_к + \omega_п = \frac{1}{2}\rho\left[\left(\frac{\partial S}{\partial t}\right)^2 + \upsilon^2\left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2\right] \rightarrow \frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x}$$

$$\omega = \frac{1}{2}\rho A^2\omega_0^2\left[1 - \underbrace{\cos 2(\omega_0 t - kx + \varphi_0)}_{среднее\quad значение = 0}\right]$$

Плотность энергии в каждый момент времени *t* и в различных точках *x* ***различна***.

Скорость переноса энергии волной равна скорости перемещения в пространстве поверхности, соответствующей максимальному значению объёмной плотности волны *ω*.

Для гармонической волны эта скорость равна фазовой скорости.

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Плоская волна

Интенсивность волны – среднее значение плотности потока энергии, переносимой волной (среднее значение вектора Умова):

$$\left\langle \vec{j} \right\rangle = \langle \omega \rangle \vec{\upsilon} = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega_0^2 \vec{\upsilon}$$

Преобразование энергии волны в другие виды энергии, происходящее при распространении волны в среде, называется ***поглощением волн***.

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x}$$

α – линейный коэффициент поглощения, зависит от свойств среды и частоты волн.

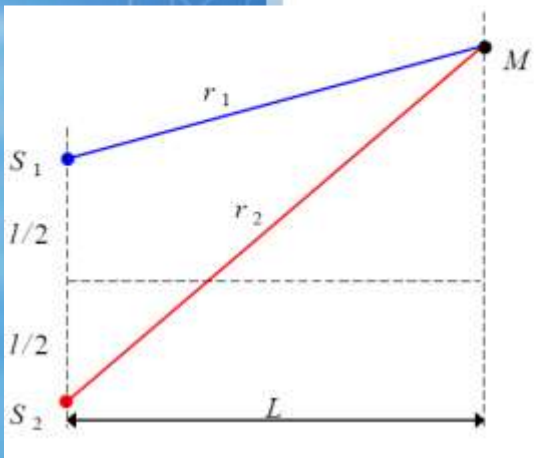
В линейной среде (между воздействием и возмущением – линейная зависимость) волны распространяются независимо друг от друга.

Следовательно, *результирующее возмущение в какой-либо точке среды при одновременном распространении в ней нескольких волн равно сумме возмущений, соответствующих каждой из этих волн по отдельности.*

Интерференция волн. Стоячие волны.

Две волны называются ***когерентными***, если разность их фаз не зависит от *t*.

Интерференция волн – явление наложения волн, при котором происходит устойчивое во времени их взаимное усилие в одних точках пространства и ослабление в других в зависимости от соотношения между фазами этих волн.



Сферические волны, возбуждаемые точечными когерентными источниками:

$$S_i = A_i \cos(\omega t - kr_i + \varphi_i)$$

Для когерентных источников разность начальных фаз $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = const$, следовательно, амплитуда А результирующей волны зависит от разности хода волн $\Delta = r_1 - r_2$.

$$k(r_1 - r_2) - (\varphi_1 - \varphi_2) = \pm 2m\pi - max$$
$$k(r_1 - r_2) - (\varphi_1 - \varphi_2) = \pm(2m+1)\pi - min$$

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Интерференция волн. Стоячие волны.

Частным случаем интерференции волн являются ***стоячие волны*** – волны, образующиеся в результате наложения 2-х бегущих гармонических волн, которые распространяются навстречу друг другу и имеют одинаковые *A и ω:*

$$S = \underbrace{2A\cos\frac{2\pi x}{\lambda}}_{A_{cm}}\cos\omega t$$

Точки среды, где $\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm m\pi, A_{cm} = 2A - max$ называются ***пучностями.***

Точки среды, где $\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm(m + 1/2)\pi, A_{cm} = 0 - min$ называются ***узлами.***

Координаты пучностей $x_n = \pm m\frac{\lambda}{2}$

Координаты узлов $x_{узл} = \pm(m \pm \frac{1}{2})\frac{\lambda}{2}$

Расстояние между двумя соседними пучностями и двумя соседними узлами одинаковое и равно *λ/2.*

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

ФИЗИКА

Движение в неинерциальных системах отсчета

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

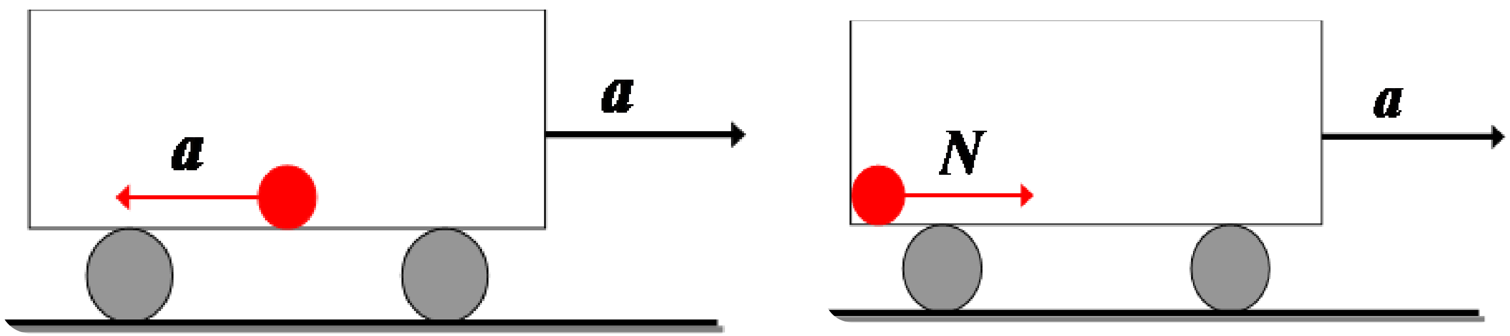
Неинерциальные механические системы.

Неинерциальные СО – системы отсчёта, движущиеся относительно инерциальных систем отсчета с ускорением.

Геоцентрическая система отсчета (жёстко связанная с Землёй) в общем случае является неинерциальной вследствие суточного вращения Земли.

Максимальное ускорение точек Земли не превосходит 0,5 % от g. Следовательно, в большинстве практических задач геоцентрическую СО считают инерциальной.

Неинерциальные механические системы.



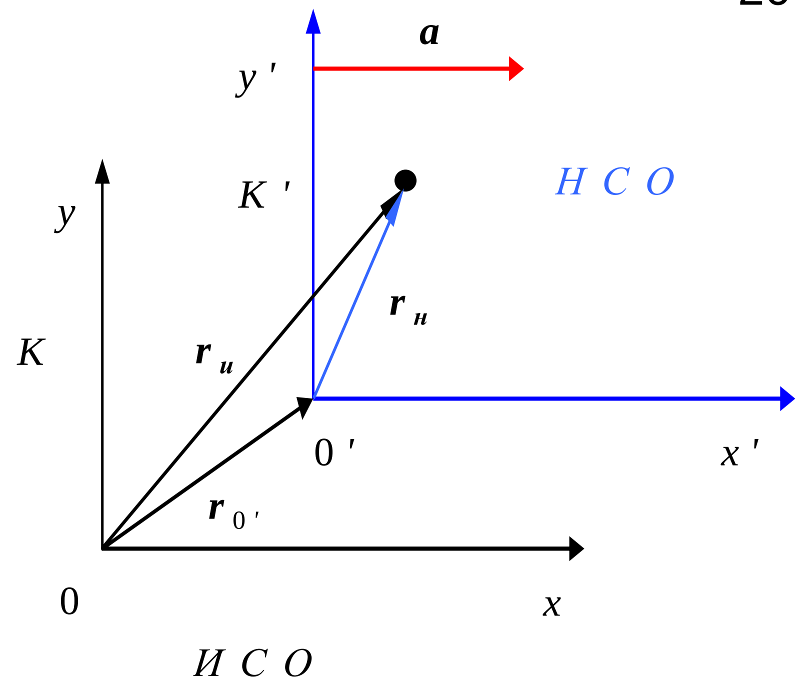
Поезд двинулся с ускорением a, шарик приобрёл ускорение a. В НСО ***первый закон Ньютона нарушается***: тело получает ускорение без взаимодействия с другими телами.

Поезд движется с ускорением, шарик у стенки, на него действует сила реакции опоры ***N***, но шарик находится в покое. В НСО ***второй закон Ньютона* нарушается**: при наличии взаимодействия, тело не получает ускорение

Принцип Даламбера.

В момент $t = 0$ системы *К* и *К'* совпадают.
Система *К'* начинает двигаться относительно *К* с ускорением ***а***.
В момент *t*:

$$\vec{\upsilon}_{0'} = \vec{a}t; \quad \vec{r}_и = \vec{r}_{0'} + \vec{r}_н,$$



$r_и$ – радиус-вектор материальной точки в системе *К*,
$r_н$ – радиус-вектор материальной точки в системе *К'*,
$r_{0'}$ – радиус-вектор начало координат системы *К'* в системе *К*.

$$\frac{d\vec{r}_и}{dt} = \frac{d\vec{r}_{0'}}{dt} + \frac{d\vec{r}_н}{dt}, \quad dt = dt' \Rightarrow$$

$$\frac{d\vec{\upsilon}_и}{dt} = \frac{d\vec{\upsilon}_{0'}}{dt} + \frac{d\vec{\upsilon}_н}{dt}, \quad \vec{\upsilon}_{0'} = \vec{a}t \Rightarrow$$

$$\vec{a}_и = \vec{a} + \vec{a}_н,$$
$$\vec{a}_н = \vec{a}_и - \vec{a},$$

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Принцип Даламбера.

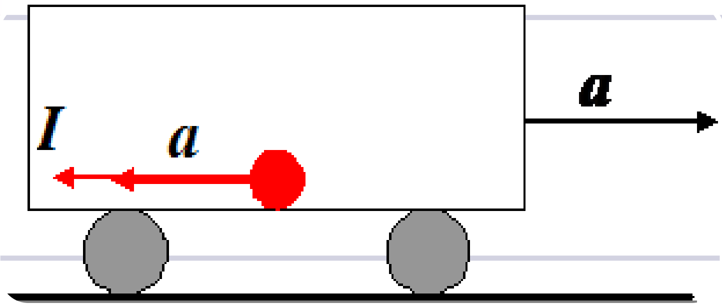
$$\boxed{m\vec{a}_н} = \underbrace{m\vec{a}_и}_{\vec{R}} - \underbrace{m\vec{a}}_{-\vec{I}} = \boxed{\vec{R} + \vec{I}}$$

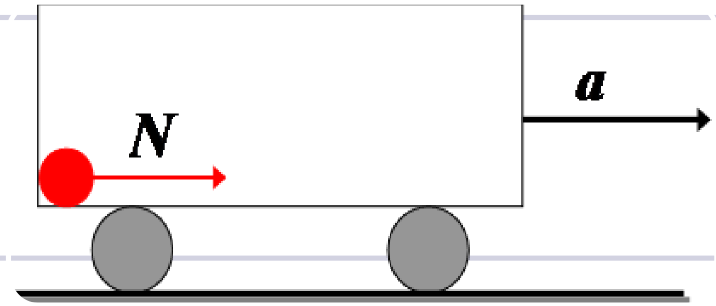
векторная сумма сил взаимодействия $\vec{R}$ сила инерции $-\vec{I}$

Произведение массы тела на его ускорение относительно НСО равно векторной сумме сил взаимодействия сложенной с силой инерции.

Сила инерции – фиктивная сила в том смысле, что она не обусловлена взаимодействием с другими телами, а вызвана ускоренным движением НСО относительно ИСО. Т.к. сила инерции обусловлена ускоренным движением системы отсчёта относительно другой СО, то она не подчиняется *третьему закону Ньютона*.

Неинерциальные механические системы.





$$\vec{a}_и = \vec{a}_н + \vec{a}$$
$$m\vec{a}_и = m\vec{a}_н + m\vec{a}$$
$$m\vec{a}_н = R + I$$

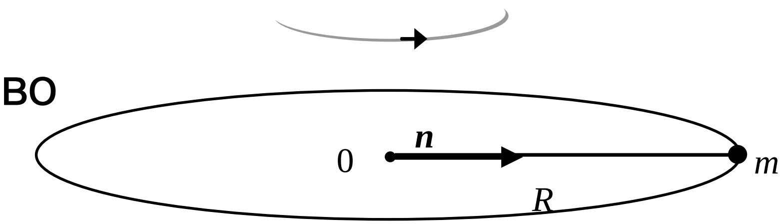
$$\frac{\overleftarrow{I}}{m} = -\vec{a}$$

$$\left|\vec{I}\right| = \left|\vec{N}\right|$$
$$\vec{I} = -m\vec{a}$$

$$m\vec{a}_н = \vec{R} + \vec{I}$$

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Сила инерции во вращающихся системах отсчёта.



Центробежная сила инерции во вращающихся СО зависит от местоположения тела в СО.

$$m\vec{a}_н = m\vec{a}_и \underbrace{- m\vec{a}}_{I}, \quad \vec{I} = -m\left(\vec{a}_и - \vec{a}_н\right)$$

Тело *m* покоится относительно диска (НСО), т.е. вращается вместе с диском

$$\vec{a}_н = 0, \vec{a}_и = -\omega^2 R\vec{n}$$

$$\vec{I} = m\omega^2 R\vec{n}, \quad \vec{R} = R\cdot\vec{n} \Rightarrow \vec{I}_{ц.б} = m\omega^2\vec{R}$$

центробежная сила инерции

Свойства центробежной силы:

1) величина центробежной силы инерции (*Fц.б*) зависит от положения тела во вращающейся СО,

2) величина *Fц.б* не зависит от скорости тела относительно вращающейся СО,

3) *Fц.б* является консервативной.

Сила инерции во вращающихся системах отсчёта.

Работа совершаемая центробежными силами не зависит от формы пути

$$A_{12} = \int_{R_1}^{R_2} m\omega^2 R \cdot dR = \frac{m\omega^2\left(R_2^2 - R_1^2\right)}{2},$$

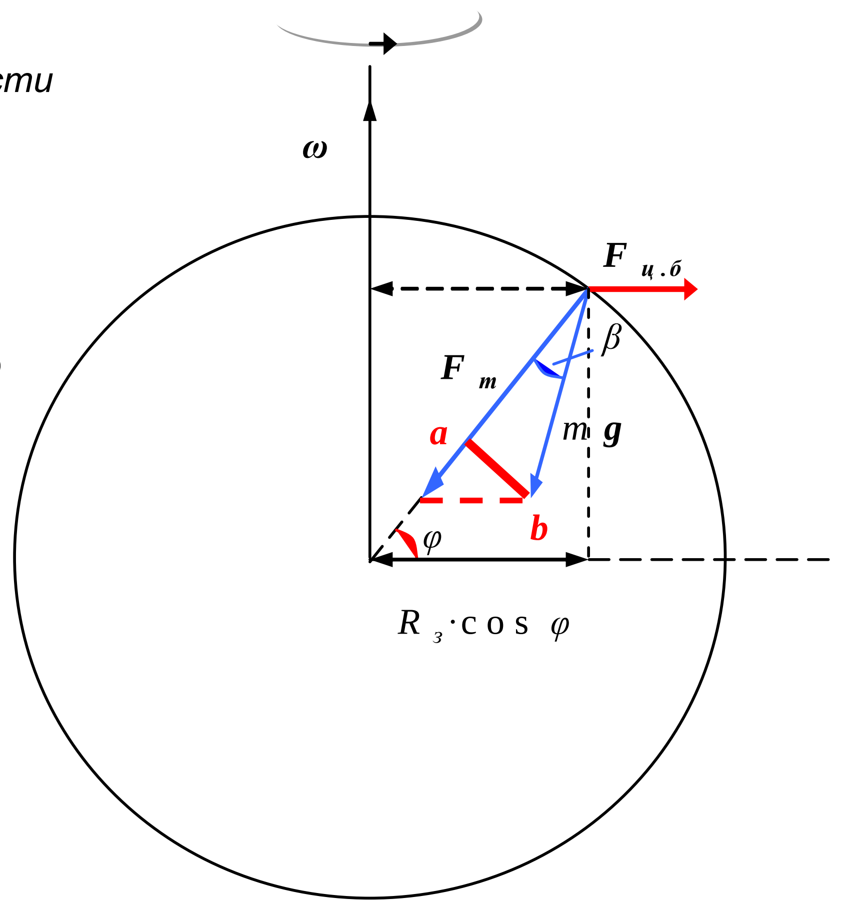
Из-за $F_{ц.б}$ направления $F_{тяжести}$ и $F_{тяготения}$ не совпадают.

$$|ab| = F_{ц.б} \sin\varphi =$$

$$= m\omega^2 R_З \cos\varphi \sin\varphi$$

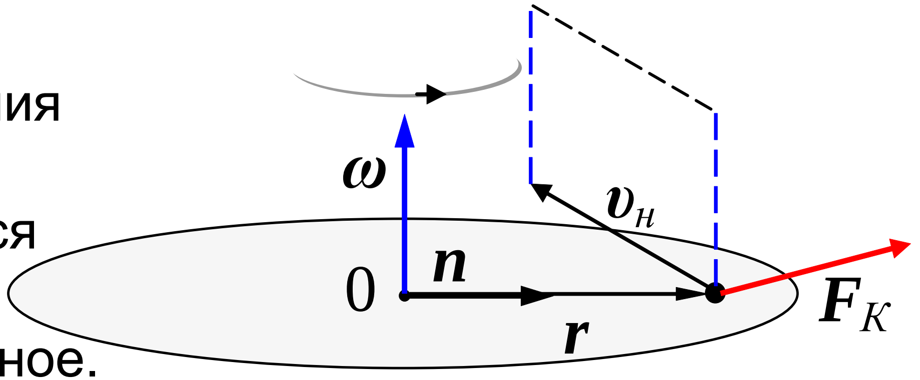
$$\sin\beta = \frac{\omega^2 R_З \sin 2\varphi}{2g} =$$

$$= 0{,}0018 \sin 2\varphi$$



Сила Кориолиса

Пусть $\boldsymbol{\upsilon}_н$ – скорость движения материальной точки относительно вращающейся СО (НСО), направление $\boldsymbol{\upsilon}_н$ произвольное.



На эту точку действует сила, обусловленная инерцией

$$\left|F_K\right| \sim \upsilon_н \cdot \omega \sin(\angle \underbrace{\vec{\upsilon}_н, \vec{\omega}}_{90^0}) = \upsilon_н \cdot \omega$$

Скорость и момент инерции точки относительно ИСО:

$$\vec{\upsilon}_и = \vec{\upsilon}_н + \vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_н + \left[\vec{\omega}, \vec{r}\right] \qquad \vec{I} = -m\left(\vec{a}_и - \vec{a}_н\right)$$

Пусть $\vec{\upsilon}_н \uparrow\uparrow \vec{\upsilon}$, тогда

$$\vec{a}_и = -\frac{\vec{\upsilon}_и^{\,2}}{r}\vec{n} = -\frac{\left(\upsilon_н + \omega r\right)_и^2}{r}\vec{n}, \vec{a}_н = -\frac{\vec{\upsilon}_н^{\,2}}{r}\vec{n}$$

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Сила Кориолиса

$$\vec{I} = m\left(2\upsilon_н\omega + \omega^2 r\right)\vec{n} \qquad \begin{cases} \vec{F}_{ц.б} = m\omega^2 r\vec{n} \\ \vec{F}_K = m2\upsilon_н\omega\vec{n} \end{cases}$$

В общем случае $\vec{F}_K = 2m\left[\vec{\upsilon}_н \cdot \vec{\omega}\right]$

Если материальная точка движется во вращающейся СО со скоростью $\upsilon_н$, то на материальную точку действует сила Кориолиса.

Свойства силы Кориолиса:

1) величина F_K не зависит от положения материальной точки во вращающейся СО,

2) величина F_K зависит от скорости $\upsilon_н$,

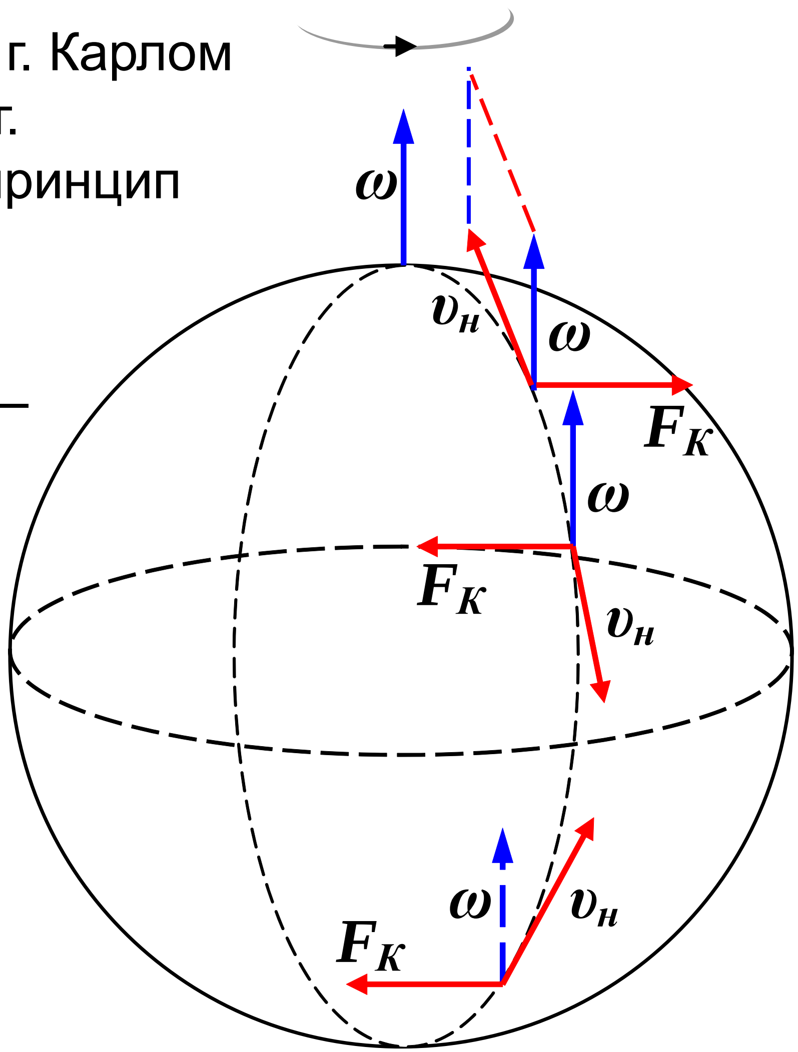
3) $\vec{F}_K \perp \vec{\upsilon}_н \Rightarrow$ F_K работы не совершает и называется ***гироскопической***.

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Закон Бэра

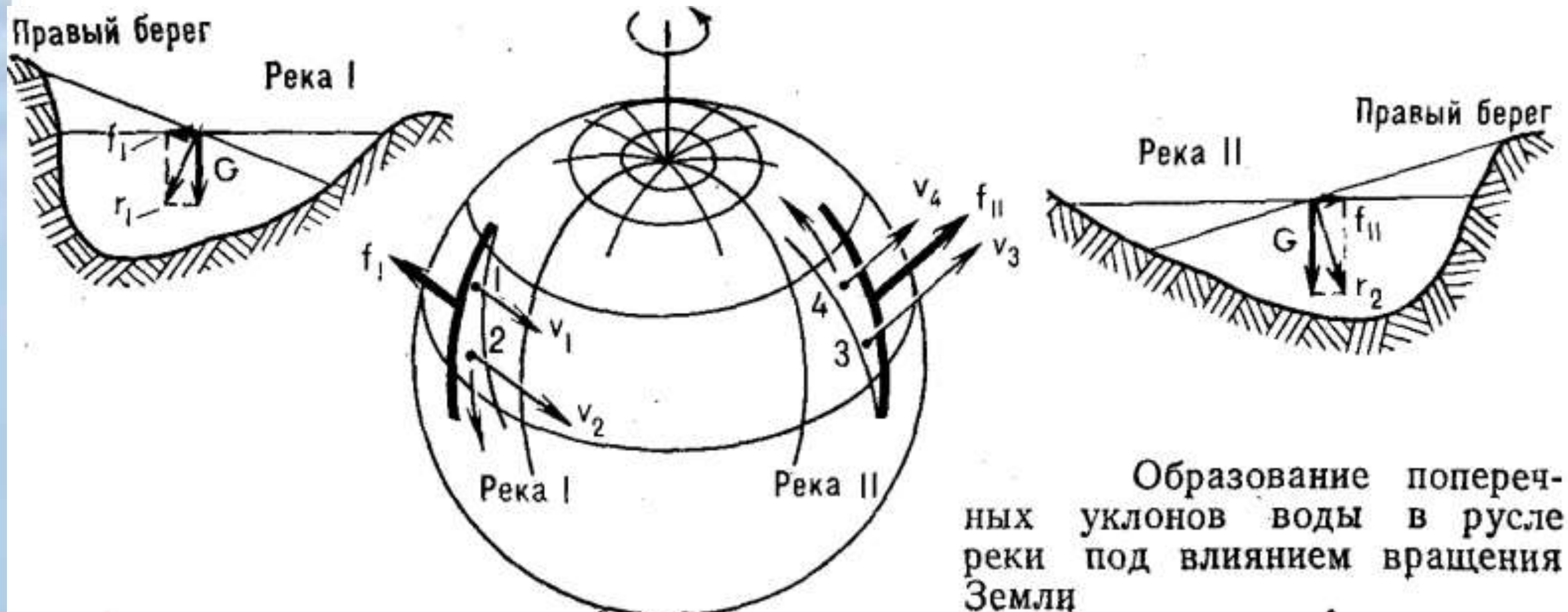
Закон сформулирован в 1857 г. Карлом Бэром по наблюдениям 1855 г.
В основе закона Бэра лежит принцип Гаспар-Гюстава Кориолиса

В северном полушарии.
Если тело движется на север – $\boldsymbol{F_К}$ на восток,
если тело движется на юг – $\boldsymbol{F_К}$ на запад.



В южном полушарии.
$\boldsymbol{F_К}$ направлена влево по отношению к направлению движения $\upsilon_н$.

Спасибо за внимание!



Образование поперечных уклонов воды в русле реки под влиянием вращения Земли

Полезные ссылки

1. А.Эйнштейна **«Причины образования извилин в руслах рек и так называемый закон Бэра»** http://ufn.ru/ufn56/ufn56_5/Russian/r565j.pdf
2. **Посадка НЛО на лед, или Чаепитие с Эйнштейном** http://kvant.mccme.ru/pdf/1999/05/kv0599surdin.pdf
3. **НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА** https://www.youtube.com/playlist?list=PLWM8IO-3TQjM-U4oVTa0wvueFCsbucQp7
4. **Гирокомпас** https://www.youtube.com/watch?v=y1zyEPK5bQM&list=UULPFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg&index=11
5. **Стробоскопический эффект** https://www.youtube.com/watch?v=KvZEbLcL2yk&list=UULPFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg&index=12
6. **Дециметровая стоячая волна** https://www.youtube.com/watch?v=K2k0N9le0Jg&list=UULPFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg&index=31
7. **Механические модели волн** https://www.youtube.com/watch?v=YJrtkpR1s24&list=UULPFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg&index=54
8. **Модель маятника Фуко** https://www.youtube.com/watch?v=AUfbvtdbeMM&list=UULPFJOp3A0Sza94wcAEZgiQsg&index=102