ВВЕДЕНИЕ

Слово "физика" греческого происхождения и первоначально означало науку о природе или естествознание. Теперь физика является лишь одной из наук о природе. Она изучает простейшие и вместе с тем наиболее общие свойства движущейся материи.

По современным представлениям материя существует в двух основных формах: в форме вещества и в форме поля. Под веществом мы понимаем элементарные частицы, атомы, молекулы и все тела, состоящие из атомов и молекул. В физике известны такие поля, как гравитационное, электромагнитное (свет, радиоволны) и ядерное. Эти две формы материи не изолированы друг от друга, они могут превращаться друг в друга. Например, гамма-квант при определенных условиях превращается в пару частиц: электрон и позитрон, которые в свою очередь могут превратиться в квант электромагнитного излучения.

Материя может существовать только в движении. Движение представляет собой вечную форму бытия материи.

Соответственно многообразию явлений природы существует и множество различных видов движения материи. Но среди этого множества можно выделить несколько основных форм, каждая из которых охватывает более или менее широкий круг явлений, родственных в определенном отношении. Это - механическая форма движения, химическая, биологическая и социальная. Физика изучает наиболее простые формы движения, которые являются и наиболее общими (механические, молекулярные и т.д.), электромагнитные, внутриатомные и ядерные явления. Другие, более высокие, формы движения изучаются другими науками, такими, как химия, биология и т.д.

Изучение физических явлений начинается с наблюдения, либо с эксперимента. Наблюдение - это изучение явления в природных условиях, в естественной обстановке. Эксперимент - изучение явления в условиях, специально созданных человеком. На основе накопленного экспериментального материала строится гипотеза - научное предположение о механизме явления и связи его с другими явлениями. Но гипотеза требует проверки и доказательств. Некоторые гипотезы противоречат опыту, оказываются ошибочными и отбрасываются при дальнейшем развитии науки (гипотезы эфира, флогистона и др.).

Гипотезы, которые выдерживают проверку на опыте и правильно предсказывают ряд явлений, которые ранее не были известны, входят в науку в качестве теорий. Правильная физическая теория дает качественное и количественное объяснение целой области явлений природы с единой точки зрения.

Однако процесс познания не ограничивается таким кругом - от опыта к теории и от теории к опыту. Скоро появляются такие факты, объяснение которых не укладывается в рамки старых теорий, и требуют выдвижения новых гипотез. Примером этого является развитие наших знаний о строении вещества. Молекулярно-кинетическая теория вещества, созданная в XIX в., исходила из того, что все тела состоят из мельчайших частиц - атомов, которые находятся в непрерывном движении. Атом - значит неделимый, что в дальнейшем оказалось не так.

Новые теории не всегда отрицают старые, в большинстве случаев они включают старые теории как часть, т.е. являются более широкими и всеобъемлющими.

Развитие физики тесно связано с развитием человеческого общества, потребностями практики. Известно, что технические потребности привели в свое время к развитию механики. Задача создания автономных тепловых машин вызвала бурное развитие термодинамики. В то же время физика оказывает огромное влияние на технику. Крупные физические открытия приводят к техническим переворотам. Например, открытие Фарадеем явления электромагнитной индукции создало возможность широкого практического использования электромагнитных явлений.

Связь между физикой и техникой двухсторонняя. Развитие техники даст физике более точные приборы и более мощные методы исследования. Так, развитие атомной физики позволило использовать в настоящее время атомную энергию в мирных целях. Широкое использование вычислительных машин оказалось возможным только благодаря достижениям физики твердого тела.

Основоположник русской физики и химии М.В. Ломоносов сочетал свою научную работу с требованиями практики. Его многочисленные и разнообразные исследования по природе твердых и жидких тел, оптике, атмосферному электричеству были связаны с теми или иными практическими задачами. А.С. Попов использовал открытие Максвелла- теорию электромагнитных процессов - для осуществления радиотелеграфии. Выдающийся ученый Н.В. Жуковский создал основы воздухоплавания. К.Э. Циолковский и И.В. Мещерский много сделали в области ракетной техники. Среди русских физиков были и теоретики, к ним относится Н.А. Умов, Л.А.Келдыш и.т.д.

Советская наука в исключительно короткие сроки добилась огромных успехов в таких решающих направлениях развития естествознания, как освоение космоса, физика элементарных частиц, физика плазмы и др.

Во всем мире известны имена наших физиков - теоретиков Л.Д. Ландау, И.Е. Тамма и т. д. И. В. Курчатов известен своими работами в области атомной физики. С. В. Королев осуществил первый космический полет. Известны и другие физики.

Физические черты и характеристики свойственны любым явлениям природы, в том числе и тем, которые используются в различных отраслях техники, причем в этом случае приходится иметь дело со сложным комплексом явлений. Таким образом, физика служит естественной основой технических наук. Например, механика является основой таких дисциплин, как теоретическая механика, теория упругости и сопротивление материалов, используемых при проектировании станков, машин, автомобилей.

Термодинамика развилась в разделы тепло - и хладотехники. Без знания вопросов электричества и магнетизма невозможно изучение таких наук, как электротехника, радиотехника, электроника, которые играют ведущую роль в развитии автоматики, телемеханики и телеуправления.

Возрастающая роль физики в современной технике получила свое выражение в появлении ряда специальных дисциплин таких, как физические основы электротехники, физические основы резания металла и др. Все глубже в технику внедряются физические методы обработки и испытания материалов, физические методы контроля производственных процессов и качества изделий и т. п

От современных инженеров требуется не только умело применять существующее оборудование, но и повсеместно развивать и совершенствовать технику. Такая творческая работа возможна только при хорошем знании физики. Вот почему хорошее усвоение физики необходимо инженеру.

Большую роль играет физика и в формировании научного мировоззрения специалиста.

Учебное пособие написано в соответствии с действующей программой курса физики для инженерно - технических специальностей высших учебных заведений и предназначено для студентов дневной, вечерней и заочной форм обучения с ограниченным числом часов по физике.

Пособие состоит из двух частей. В первой части дано изложение физических основ классической механики и рассмотрены элементы специальной теории относительности. Вторая часть посвящена основам молекулярной физики и термодинамики. Сведения о размерностях физических величин и системных единиц вынесены в приложения.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Механика - часть физики, которая изучает закономерности механического движения и причины, вызывающие или изменяющие это движение.

Механическое движение - это изменение с течением времени взаимного расположения тел или их частей.

Развитие механики как науки начинается с III в. до н.э., когда древнегреческий ученый Архимед (287 - 212 гг. до н.э.) сформулировал закон равновесия рычага и законы равновесия плавающих тел. Основные законы механики установлены итальянским физиком и астрономом Г. Галилеем (1564 - 1642 гг.) и окончательно сформулированы английским ученым И. Ньютоном (1643 – 1727 гг.).

Механика Галилея - Ньютона называется **классической** механикой. В ней изучаются законы движения макроскопических тел, скорости которых малы по сравнению со скоростью света в вакууме. Законы движения этих тел со скоростями, сравнимыми со скоростью света изучаются **релятивистской механикой**, основанной на **специальной теории относительности**, сформулированной А. Эйнштейном (1879 - 1955 гг.). Для описания движения микроскопических тел (отдельные атомы и элементарные частицы) законы классической механики неприменимы - они заменяются законами **квантовой механики.**

В первой главе нашего курса мы будем иметь дело с механикой Галилея - Ньютона, т.е. будем рассматривать движение макроскопических тел со скоростями, значительно меньшими скорости света. В классической механике общепринята концепция пространства и времени, разработанная И. Ньютоном и господствовавшая в естествознании на протяжении XVII - XIX вв. Механика Галилея - Ньютона рассматривает пространство и время как объективные формы существования материи, но в отрыве друг от друга и от движения материальных тел, что соответствует уровню знаний того времени.

Так как механическое описание наглядно и привычно и с его помощью можно объяснить многие физические явления, в XIX в. некоторые физики стали сводить все явления к механическим. Эта точка зрения соответствовала философскому механическому материализму. Дальнейшее развитие физики показало, однако, что многие физические явления не могут быть сведены к простейшему виду движения - механическому. Механистический материализм должен был уступить место материализму диалектическому, рассматривающему более общие виды движения материи и учитывающему все разнообразие реального мира.

Механика делится на три раздела: кинематику, динамику, статику.

Кинематика изучает движение тел, не рассматривая причины, которые это движение обусловливают.

Динамика изучает законы движения тел и причины, которые вызывают или изменяют это движение.

Статика изучает законы равновесия тел. Если известны законы движения тел, то из них можно установить и законы равновесия. Поэтому законы статики отдельно от законов динамики не рассматриваются.

1. КИНЕМАТИКА

1.1. Модели в механике. Система отсчета.

Траектория, длина пути, вектор перемещения

Механика для описания движения тел в зависимости от условий конкретных задач использует разные **физические модели**. Простейшей моделью является **материальная точка** - тело, обладающее массой, размером которого в данной задаче можно пренебречь. Понятие материальной точки абстрактное, но его введение облегчает решение практических задач. Например, изучая движение планет по орбитам вокруг Солнца, можно принять их за материальные точки.

Произвольное макроскопическое тело или систему тел можно мысленно разбить на целые, взаимодействующие между собой части, каждая из которых рассматривается как материальная точка. Тогда изучение движения произвольной системы тел сводится к изучению **системы материальных точек** . В механике сначала изучают движение одной материальной точки, а затем переходят к изучению движения системы материальных точек.

Под воздействием тел друг на друга тела могут деформироваться, т.е. изменять свою форму и размеры. Поэтому в механике вводится еще одна модель - абсолютно твердое тело. **Абсолютно твердым телом** называется тело, которое ни при каких условиях не может деформироваться и при всех условиях расстояние между двумя точками (или точнее между двумя частицами) этого тела остается постоянным.

Любое движение твердого тела можно представить как комбинацию поступательного и вращательного движений. **Поступательное движение** - это движение, при котором любая прямая, жестко связанная с движущимся телом, остается параллельной своему первоначальному положению. **Вращательное движение** - это движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой **осью вращения**.

Движение тел происходит в пространстве и во времени. Поэтому для описания движения материальной точки надо знать, в каких местах пространства эта точка находилась и в какие моменты времени она проходила то или иное положение.

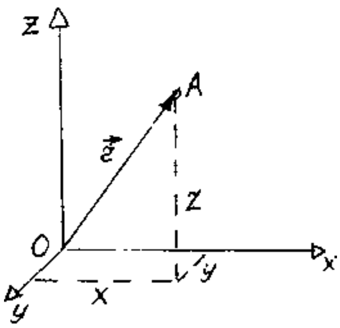


Рис. 1

Положение материальной точки определяется по отношению к какому-либо другому, произвольно выбранному телу, называемому **телом** отсчета. С ним связывается **система отсчета** - совокупность системы координат и часов, связанных с телом отсчета. В декартовой системе координат, используемой наиболее часто, положение точки A в данный момент времени по отношению к этой системе характеризуется тремя координатами x, y и z или радиусом-вектором $\vec{r}$, проведенным из начала системы координат в данную точку (рис.1) При движении материальной точки ее координаты с течением времени изменяются.

В общем случае ее движение определяется скалярными уравнениями:

$$x = x(t),\quad y = y(t),\quad z = z(t), \tag{1.1}$$

эквивалентными векторному уравнению

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \tag{1.2}$$

Уравнении (1.1), (1.2) называются **кинематическими уравнениями движения материальной точки.**

Число независимых координат, полностью определяющих положение точки в пространстве, называется **числом степеней свободы**. Если материальная точка свободно движется в пространстве, то, как уже было сказано, она обладает тремя степенями свободы (координаты x, y, z); если она движется по некоторой поверхности, то - двумя степенями свободы; если вдоль некоторой линии, то - одной.

Исключая t в уравнениях (1.1) и (1.2), получим уравнение траектории движения материальной точки. **Траектория** движения материальной точки - линия, описываемая этой точкой в пространстве. В зависимости от формы траектории движение может быть прямолинейным или криволинейным.

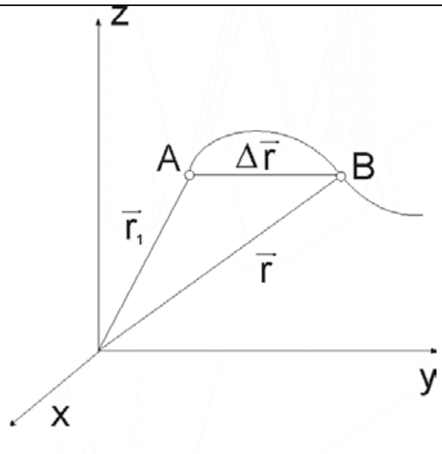


Рис. 2

Рассмотрим движение материальной точки вдоль произвольной траектории (рис.2). Отсчет времени начнем с момента, когда точка находилась в положении А. Длина участка траектории АВ, пройденного материальной точкой с момента начала отсчета времени, **называется длиной** пути Δs и является **скалярной** функцией времени: $\Delta s = \Delta s(t)$.

Вектор $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$, проведенный из начального положения движущейся точки в положение ее в данный момент времени (приращение радиуса-вектора точки за рассматриваемый промежуток времени), называется **перемещением**.

При прямолинейном движении вектор перемещения совпадает с соответствующим участком траектории, и модуль перемещения $|\Delta\vec{r}|$ равен пройденному пути Δs.

1.2. Скорость

Для характеристики движения материальной точки вводится векторная величина - скорость, которой определяется как **быстрота** движения, так и его **направление** в данный момент времени. Пусть материальная точка движется по какой-либо криволинейной траектории так, что в момент времени t ей соответствует радиус-вектор $\vec{r}_0$ (рис.3). В течение малого промежутка времени Δt точка пройдет путь ΔS получит элементарное (бесконечно малое) перемещение $\Delta\vec{r}$.

Вектором средней скорости $\langle\vec{v}\rangle$ называется отношение приращения $\Delta\vec{r}$ радиуса-вектора точки к промежутку времени Δt:

$$\langle\vec{v}\rangle = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \qquad (1.3).$$

Направление вектора средней скорости совпадает с направлением $\Delta\vec{r}$. При неограниченном уменьшении Δt средняя скорость стремится к предельному значению, которое называется **мгновенной скоростью** $\vec{V}$:

$$\vec{V} = \lim_{\Delta\ell\to 0}\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

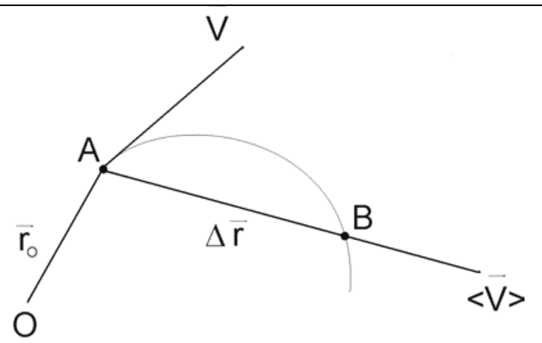


Рис. 3

Мгновенная скорость $\vec{V}$, таким образом, есть векторная величина, равная первой производной радиус-вектора движущейся точки по времени.

Так как секущая в пределе совпадает с касательной, то вектор скорости $\vec{V}$ направлен по касательной к траектории в сторону движения (рис.3). По мере уменьшения Δt путь Δs все больше будет приближаться к $|\Delta\vec{r}|$, поэтому

модуль мгновенной скорости

$$|\vec{V}| = \left|\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}\right| = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}.$$

Таким образом, модуль мгновенной скорости равен первой производной пути по времени:

$$\vartheta = \frac{ds}{dt}. \qquad (1.4)$$

При неравномерном движении модуль мгновенной скорости с течением времени изменяется. В данном случае пользуются скалярной величиной $<\vartheta>$- **средней** скоростью неравномерного движения:

$$\langle \vartheta \rangle = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Из рис.3 вытекает, что $<\vartheta> > |\langle \vec{v} \rangle|$, так как s>$|\Delta \vec{r}|$и только в случае прямолинейного движения $\Delta s = |\Delta \vec{r}|$.

Если выражение ds = ϑ dt (1.4) проинтегрировать по времени в пределах от t до t + Δ t, то найдем длину пути, пройденного точкой за время Δ t:

$$s = \int_{t}^{t+\Delta t} \vartheta dt \tag{1.5}$$

В случае **равномерного движения** числовое значение мгновенной скорости постоянно; тогда выражение (1.5) примет вид

$$s = \vartheta \int_{t}^{t+\Delta t} dt = \vartheta dt$$

1.3. Ускорение и его составляющие

В случае неравномерного движения важно знать, как быстро изменяется скорость с течением времени. Физической величиной, характеризующей быстроту изменения скорости по модулю и направлению, является **ускорение**. Рассмотрим **плоское движение**, т.е. такое, при котором все траектории точки лежат в одной плоскости. Пусть вектор $\vec{v}$ задает скорость точки А в момент времени t. За время Δt движущаяся точка перешла в положение В и приобрела скорость, отличную от $\vec{v}$ как по модулю, так и направлению и равную $\vec{v}_1 = \vec{v} + \Delta\vec{v}$. Перенесем вектор $\vec{v}_1$ в точку А и найдем $\Delta \vec{v}$ (рис.4).

Средним ускорением неравномерного движения в интервале от t до t+Δt называется векторная величина, равная отношению изменения скорости $\Delta \vec{v}$ к интервалу времени Δt:

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Мгновенным ускорением $\vec{a}$ (ускорением) материальной точки в момент времени t будет предел среднего ускорения:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \langle \vec{a} \rangle = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Таким образом, ускорение $\vec{a}$ есть векторная величина, равная первой производной скорости по времени.

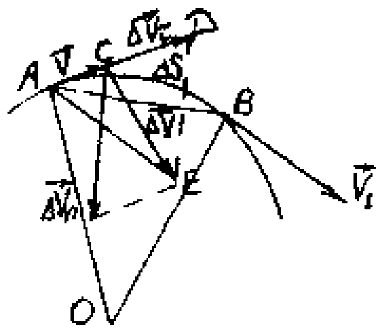


Рис. 4

Разложим вектор $\Delta \vec{v}$ на две составляющие. Для этого из точки А (рис.4) по направлению скорости $\vec{v}$ отложим вектор $\vec{AD}$, по модулю равный $\vec{v}_1$. Очевидно, что вектор $\vec{CD}$, равный $\Delta\vec{v}_\tau$, определяет изменение скорости по модулю за время Δt:

$$\Delta\vartheta_\tau = \vartheta_1 - \vartheta.$$

Вторая же составляющая вектора $\Delta\vec{v}$ - $\Delta\vec{v}_n$ характеризует изменение скорости за время Δt **по направлению**.

$$a_\tau = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vartheta_\tau}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} = \frac{d\vartheta}{dt},$$

т.е. равна первой производной по времени от модуля скорости и определяет тем самым быстроту изменения скорости по модулю.

Найдем вторую составляющую ускорения. Допустим, что точка В достаточно близка к точке А, поэтому ΔS можно считать дугой окружности некоторого радиуса r, мало отличающегося от хорды АВ. Тогда из подобия треугольников АОВ и ЕАD следует $\frac{\Delta\vartheta_n}{AB} = \frac{\vartheta_1}{r}$, но т.к. АВ = ϑ Δt, то $\frac{\Delta\vartheta_n}{\Delta t} = \frac{\vartheta\vartheta_1}{r}$. В пределе при t→0 получим $\vec{v}_1 \to \vec{v}_2$.

Поскольку $\vec{v}_1 \to \vec{v}$, угол EAD стремится к нулю, а т. к. треугольник EAD равнобедренный, то угол ADE между $\vec{v}$ и $\Delta\vec{v}_n$ стремится к прямому. Следовательно, при t→0 векторы $\vec{v}$ и $\Delta\vec{v}_n$ оказываются взаимно перпендикулярными. Так как вектор скорости направлен по касательной к траектории, то вектор $\Delta\vec{v}_n$, перпендикулярный к вектору скорости, направлен к центру ее кривизны. Вторая составляющая ускорения, равная

$$a_n = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vartheta_n}{\Delta t} = \frac{\vartheta^2}{r},$$

называется **нормальной составляющей ускорения** и направлена по нормали к траектории, к центру ее кривизны (поэтому ее называют также **центростремительным ускорением**).

Полное ускорение тела есть геометри-

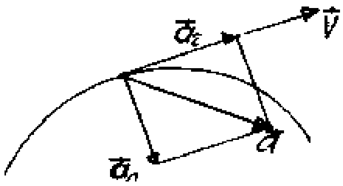


Рис.5

ческая сумма тангенциальной и нормальной со

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n.$$

Тангенциальная составляющая ускорения характеризует **быстроту изменения** скорости по модулю (направлена по касательной к траектории), а **нормальная** составляющая ускорения - быстроту изменения скорости по направлению (направлена к центру кривизны траектории).

В зависимости от тангенциальной и нормальной составляющих ускорения движение можно классифицировать следующим образом:

$a_\tau = 0$, $a_n = 0$ - прямолинейное равномерное движение;

$a_\tau = a = const$, $a_n = 0$ - прямолинейное равнопеременное движение. При таком виде движения $a_\tau = a = \frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{t_2 - t_1}$. Если начальный момент времени t =0, а начальная скорость $\vartheta_1 = \vartheta_O$, то, обозначив $t_2 = t$ и $\vartheta_2 = \vartheta$, получим $a = \frac{\vartheta - \vartheta_0}{t}$, откуда $\vartheta = \vartheta_0 + at$.

Проинтегрировав формулу $ds = \vartheta dt$ в пределах от нуля до произвольного момента времени t , получим длину пути, пройденного тонкой, в случае равнопеременного движения:

$$s = \int_0^t \vartheta dt = \int_0^t (\vartheta_0 + at)dt = \vartheta_0 t + \frac{at^2}{2};$$

$a_\tau = f(t)$, $a_n = 0$ - прямолинейное движение с переменным ускорением;

$a_\tau = 0$, $a_n = const$. При $a_\tau = 0$ скорость по модулю не изменяется, а изменяется по направлению. Из формулы $a_n = \frac{\vartheta^2}{r}$ следует, что радиус кривизны должен быть постоянным. Следовательно, движение по окружности является равномерным;

$a_\tau = 0,\ a_n \neq 0$ - равномерное криволинейное движение;

$a_\tau = const,\ a_n \neq 0$ - криволинейное равнопеременное движение;

$a_\tau = f(t),\ a_n \neq 0$ - криволинейное движение с переменным ускорением.

▪Пример

1.4 Угловая скорость и угловое ускорение

Рассмотрим твердое тело, которое вращается вокруг неподвижной оси. Тогда отдельные точки этого тела будут описывать окружности разных радиусов, центры которых лежат на оси вращения. Пусть некоторая точка движется по окружности радиуса R (рис.6). Ее положение через промежуток времени Δ t зададим углом $\Delta\varphi$. Элементарные (бесконечно малые) углы поворота рассматриваются как векторы. Модуль вектора $d\varphi$ равен углу поворота, а его направление совпадает с направлением поступательного движения острия винта, головка которого вращается в направлении движения точки по окружности, т.е. подчиняется **правилу правого винта** (рис.6).

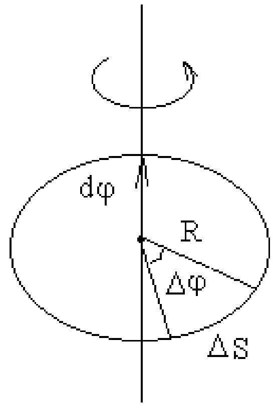


Рис. 6

Векторы, направление которых связывается с направлением вращения, называются **псевдовекторми или аксиальными векторами**. Эти векторы не имеют определенных точек приложения: они могут откладываться из любой точки оси вращения.

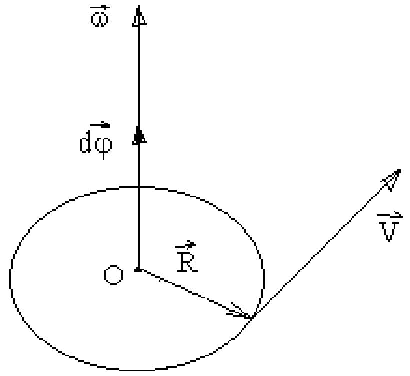
Угловой скоростью называется векторная величина, равная первой производной угла поворота тела по времени:

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}.$$

Вектор $\vec{\omega}$ направлен вдоль оси вращения по правилу правого винта, т.е. так же, как и вектор $d\vec{\varphi}$ (рис.7).

В векторном виде формулу для линейной скорости можно написать как векторное произведение:

$$\vec{v} = \left[\vec{\omega}\vec{R}\right].$$



Размерность угловой скорости dim $\omega = T^{-1}$, а ее единица - радиан в секунду (рад/с). Линейная скорость точки:

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{R\Delta\varphi}{\Delta t} = R \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = R\omega,$$

т.е. $v = \omega R$.

Рис. 7

Если ω=const, то вращение равномерное и его можно характеризовать **периодом вращения** T – временем, за которое точка совершает один полный оборот, т.е. поворачивается на угол 2π. Так как промежуток времени Δt=T соответствует $\Delta\varphi = 2\pi$, то $\omega = \frac{2\pi}{T}$, откуда $T = \frac{2\pi}{\omega}.$

Число полных оборотов, совершаемых телом при равномерном его движении по окружности в единицу времени, называется **частотой вращения** $n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$, откуда $\omega = 2\pi n.$

Угловым ускорением называется векторная величина, равная первой производной угловой скорости по времени:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{d\vec{t}}.$$

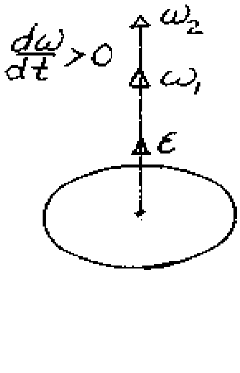
При вращении тела вокруг неподвижной оси вектор углового ускорения направлен вдоль оси вращения в сторону вектора элементарного приращения угловой скорости. При ускоренном движении вектор $\vec{\varepsilon}$ сонаправлен вектору $\vec{\omega}$ (рис. 8), при замедленном - противонаправлен ему (рис.9).

Тангенциальная составляющая ускорения

$$a_\tau = \frac{d\vartheta}{dt},\ \vartheta = \omega R \quad \text{и} \quad a_\tau = \frac{d(\omega R)}{dt} = \frac{R d\omega}{dt} = R\varepsilon.$$

Нормальная составляющая ускорения

$$a_n = \frac{\vartheta^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R.$$



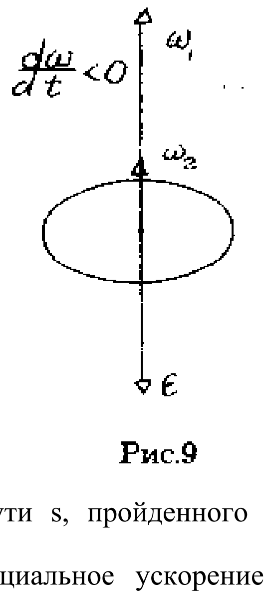


Рис.8 **Рис.9**

Таким образом, связь между линейными (длина пути s, пройденного точкой по дуге окружности радиуса R, линейная скорость ϑ, тангенциальное ускорение a, нормальное ускорение a_n) и угловыми величинами (угол поворота φ, угловая скорость ω, угловое ускорение ε) выражается следующими формулами:

$$s=R\varphi,\quad \vartheta=R\omega,\quad a_\tau=R\varepsilon,\quad a_n=\omega^2R.$$

В случае равнопеременного движения точки по окружности (ε=const): $\omega=\omega_o \pm\varepsilon t$, $\varphi = \omega_0 t \pm \dfrac{\varepsilon t^2}{2}$, где ω_0 - начальная угловая скорость.