

Высшее профессиональное образование

БАКАЛАВРИАТ

Б. А. СТРУКОВ, Л. Г. АНТОШИНА, С. В. ПАВЛОВ

ФИЗИКА

Под редакцией проф. Б. А. Струкова

*Учебник для студентов
учреждений высшего профессионального образования,
обучающихся по направлениям подготовки
«Экология и природопользование»,
«Почвоведение», «Геология», «География»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2011

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73
С873

Рецензенты:

засл. деятель науки РФ, д-р физ.-мат. наук, проф. *Ю. А. Гороховатский*
(зав. кафедрой общей и экспериментальной физики
Российского гос. пед. ун-та им. А. И. Герцена);
канд. биол. наук, доц. *В. М. Гончаров*
(зам. декана по учебной работе факультета почвоведения
МГУ им. М. В. Ломоносова)

Струков Б. А.

С873 **Физика : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / Б. А. Струков, Л. Г. Антошина, С. В. Павлов ; под ред. Б. А. Струкова. — М. : Издательский центр «Академия», 2011. — 400 с. — (Сер. Бакалавриат).**

ISBN 978-5-7695-6521-2

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлениям подготовки «Экология и природопользование», «Почвоведение», «Геология», «География» (квалификация «бакалавр») на основе курса лекций, читаемых авторами в течение ряда лет на факультете почвоведения МГУ им. М. В. Ломоносова.

Данный учебник предназначен для студентов естественно-научных специальностей университетов, для которых физика не является профилирующей дисциплиной.

Материалы, представленные в учебнике, охватывают основные разделы курса общей физики и рассчитаны на изучение в течение не менее 90 ч лекционных занятий.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования. Может быть полезен для технических специальностей вузов.

УДК 53(075.8)
ББК 22.3я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым
способом без согласия правообладателя запрещается*

© Струков Б. А., Антошина Л. Г., Павлов С. В., 2011
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2011
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2011

ISBN 978-5-7695-6521-2

Предлагаемый учебник по курсу общей физики предназначен для студентов естественно-научных специальностей высших учебных заведений, для которых физика является не профильным предметом, и объем аудиторных занятий по физике не превышает 180 ч. Появление учебника продиктовано тем, что большинство старых учебников стало библиографической редкостью, а сравнительно новые (и достаточно часто переиздающиеся) учебные пособия по физике по своему объему более соответствуют профильной физике. Авторы исходили из того, что, несмотря на ограниченное количество часов, для будущих биологов, почвоведов, геологов, географов физика важна и как основа формирования профессионального базиса, и как системообразующий предмет, важный элемент которого — инвариантная часть, не зависящая от области специализации и являющаяся основой любой образовательной программы в области естественных наук.

Объем каждой главы примерно соответствует материалу, который может быть изложен на одной лекции. Многолетний опыт преподавания авторами физики в вузе приводит к очевидному выводу, что даже при исключении целого ряда разделов, которые обычно рассматриваются в университетских курсах физики, для логически цельного и последовательного изложения материала необходимы три семестра; и именно в этих временных рамках предлагаемый курс может быть изложен с необходимой и равномерной степенью глубины и детализации, на основе которых могут быть определены содержания соответствующих модулей и уровень приобретаемых компетенций. На базе полученных знаний должны строиться последующие профилированные курсы биофизики, физики почв, геофизики, физической географии и др.

В учебнике не приведены упражнения и практические задания, поскольку необходимые сведения для семинарских занятий (в первом семестре одна лекция — один семинар, во втором семестре две лекции — один семинар, в третьем семестре лекционные занятия не сопровождаются семинарами) и лабораторных работ (одна лабораторная работа на две лекции в первом и втором семестрах) можно найти в учебных пособиях: *Общая физика: Сборник задач / Л. Г. Антошина, С. В. Павлов, Л. А. Скипетрова; под ред. Б. А. Струкова. — М.: Изд-во ИНФРА-М, 2006* и *Общая физика: Руководство по лабораторному практикуму; под ред. И. Б. Крынецкого и Б. А. Струкова. — М.: Изд-во ИНФРА-М, 2008.*

Предлагаемый курс охватывает основные разделы физики — классическую механику, молекулярную физику, термодинамику,

электромагнетизм и волновую оптику, элементы квантовой механики; их изложение на университетском уровне требует применения адекватного математического аппарата с элементами векторного, дифференциального и интегрального анализа. Авторы полагают, что оптимальный учебный план по естественно-научным направлениям строится таким образом, что курс высшей математики «опережает» физику по крайней мере на один семестр.

Главы 1—3, 5—12, 14—32 написаны Б. А. Струковым, главы 33—42 — Л. Г. Антошиной, главы 4, 13, 43—46 — С. В. Павловым. Подготовка рукописи к изданию осуществлена С. В. Павловым.

Глава 1

ПРЕДМЕТ ФИЗИКИ. ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ

1.1. Предмет физики

Предмет «Физика» входит в программу всех естественно-научных специальностей университетов.

Физика — наука, изучающая наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи, законы ее движения.

Поэтому физика тесно связана с медициной, биологией, геологией, географией, почвоведением — со всеми науками, изучающими законы неживой и живой природы.

В настоящее время исследователи вполне обосновано полагают, что *самые сложные природные системы, включая и живые, функционируют по правилам, которые не выходят за рамки основных фундаментальных физических законов*. Такие физические законы, как закон сохранения энергии, закон всемирного тяготения, законы электродинамики, квантовой механики, являются естественной основой более сложных химических, биологических и других законов, не исчерпывая, однако, их содержания. Кроме того, *физика — основа современной техники, информационных технологий*, которые, в свою очередь, дают ей все новые экспериментальные возможности в изучении природы.

Для таких наук, как геофизика, физика почв, биофизика, общая физика является естественным фундаментом.

Показательно, что одно из великих достижений науки XX в. — открытие двойной спирали ДНК, положившее начало *молекулярной биологии*, — было сделано в физической лаборатории в Кембриджском университете Великобритании, в той самой лаборатории, в которой за несколько десятков лет до этого было открыто строение атома.

В данном курсе мы будем последовательно осваивать понятийный аппарат физики, формулировать основные физические законы, развивать умение применять эти законы для решения различных задач.

Физическая картина мира основывается на принципиальной возможности описания объектов и явлений с помощью математических методов. В школе это была элементарная математика, здесь мы будем постоянно использовать *элементы математического анализа, дифференциальные уравнения, векторный анализ* для описания движений различного типа. Таким образом, физика является еще тестом и полигоном для применения на практике математических знаний.

1.2. Физические модели

Физическая модель — одно из важнейших понятий в физике.

Под *физической моделью* понимается некоторое *упрощенное представление реального объекта или процесса, достаточное, однако, для сохранения его индивидуальности и наиболее существенных свойств*. Выбор физической модели объекта или явления — важнейший элемент физического подхода к их анализу. Слишком подробное описание, детализация усложняют математическое описание, «затеняют» существо дела.

В некоторых ситуациях предмет достаточно сложной формы можно заменить просто материальной точкой — в случаях, когда масштаб движения в задаче много больше размеров предмета.

Материальная точка — тело, размерами которого в масштабах данной задачи можно пренебречь.

При выяснении особенностей движения тел под действием сил можно иногда не принимать во внимание трение, сопротивление воздуха, ввести понятие недеформируемого тела, невесомой и нерастяжимой нити и т. д.

Например, при описании такого сложного объекта, каким является *молекула вещества*, в зависимости от ситуации можно применять различные модели молекул: если необходимо исследовать давление молекул газа внутри замкнутого сосуда, то вполне достаточно считать молекулы упругими шариками. Если нас интересует теплоемкость газа или его спектральные характеристики, то такого представления недостаточно, а нужно учитывать структуру молекулы, представлять ее в виде пространственной геометрической фигуры и т. д.

Степень сложности физической модели должна адекватно соответствовать степени сложности того явления, которое нужно охарактеризовать качественно или количественно.

Проверка правильности выбранной модели — опыт. Только так можно исключить массу побочных факторов, сопутствующих на-

блюдению явления в природных условиях и скрывающих подчас его суть.

Курс физики состоит из следующих разделов: механика, механические колебания и волны, молекулярная физика и термодинамика, электричество и магнетизм, включая электромагнитные колебания и волны, оптика, элементы квантовой механики и строения вещества. Мы начинаем изучать курс физики с законов механики — законов, управляющих перемещением материальных тел в пространстве.

Приведем несколько явлений из области механики, которые мы научимся анализировать и объяснять.

1. Во всех естественно-природных ситуациях скорость движения любого тела уменьшается, и все тела рано или поздно останавливаются. Однако у всех на виду практически вечное движение планет. Кроме того, очевиден тот факт, что при уменьшении фактора торможения — сил трения — график зависимости скорости движения любого тела от времени приближается к прямой $v = \text{const} = v_0$. Таким образом, если «отсечь» все мешающие факторы (в данном случае — силы трения), то выделится нечто главное — способность любого тела *сохранять равномерное и прямолинейное движение* при отсутствии взаимодействия с другими телами.

2. Законы, определяющие вращательное движение тел. Планета Земля вращается и сохраняет постоянное направление оси вращения — почему?

3. Плоскость колебаний маятника должна оставаться постоянной. Между тем с помощью маятника Фуко можно наблюдать поворот плоскости колебаний. Какие силы заставляют ее поворачиваться?

Курс начинается с механики, и это естественно: механика является первым разделом физики, содержащим в себе множество общефизических понятий, которые используются в других разделах.

1.3. Физические основы механики. Кинематика движущейся материальной точки

Любое движение происходит в пространстве и во времени. Эти два понятия — **пространство и время** — относятся к наиболее фундаментальным понятиям физики, и их невозможно определить через другие, более общие понятия.

Будем полагать, что:

- **физическое пространство** — одно из фундаментальных понятий физики, с помощью которого описываются свойства протяженности и взаимного расположения материальных объектов;

- **физическое время** — одно из фундаментальных понятий физики, характеризующих длительность и последовательность событий или следующих друг за другом состояний материальных объектов.

Выяснение зависимости пространственных характеристик материальных объектов от времени в различных условиях и есть суть описания движения этих объектов. Как определить положение в пространстве материального тела? Очевидно, прежде всего, нужна система координат. Но выбрать систему координат в совершенно пустом пространстве — физически бессодержательное требование. Нужно иметь какое-то другое материальное тело — «тело отсчета», например вагон поезда, Землю, Солнце, отдаленную звезду, т. е. тело, с которым можно жестко связать прямоугольную правую систему координат с направляющими единичными векторами осей $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — вдоль, соответственно, осей OX, OY и OZ , причем для правой системы $\vec{k} = [\vec{i} \cdot \vec{j}]$, квадратные скобки означают векторное произведение.

Объект, положение которого мы хотим описать, может быть, например:

а) материальной точкой, положение которой задается тремя координатами — x, y, z , или **радиусом-вектором** — вектором, соединяющим начало координат системы отсчета и ту точку, в которой в данный момент времени она находится $\vec{r} : \vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$. Три координаты, необходимые для полного описания положения точки в пространстве, означают, что материальная точка имеет **три степени свободы**;

б) одномерным объектом — отрезком MN длины L : x_1, y_1, z_1 — координаты одного конца; x_2, y_2, z_2 , — координаты второго конца (рис. 1.1). Эти шесть координат, определяющие положение концов двух векторов $\vec{r}_1 = x_1\vec{i} + y_1\vec{j} + z_1\vec{k}$ и $\vec{r}_2 = x_2\vec{i} + y_2\vec{j} + z_2\vec{k}$, связаны определенным соотношением: расстояние L между точками M и N , т. е.

длина отрезка MN : $L = |\Delta\vec{r}_{12}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$. Таким образом, положение отрезка в пространстве может быть описано пятью независимыми числами, т. е. отрезок имеет **пять степеней свободы**.

Важно, что величина L инвариантна относительно выбора системы координат.

Количественно длина L отрезка может быть измерена с помощью эталона — другого отрезка длиной l , принятой за единицу длины. Сравнивая длину отрезка $MN = L$ с l , т. е., составляя отношение $\frac{L}{l} = n$,

$L = nl$, получаем для любого отрезка длину, выражаемую в единицах l .

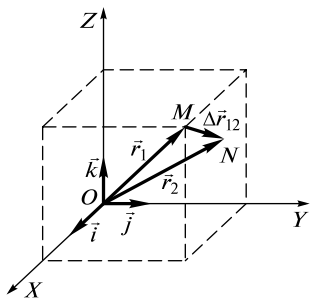


Рис. 1.1

Принятый эталон длины — 1 метр (1 м) — это линейка из сплава платины с 10 % иридия, поперечному сечению которой для повышения изгибной жесткости при минимальном объеме металла была придана особая X-образная форма; 1 метр определяется как расстояние между центрами двух штрихов, нанесенных поперек линейки на ее концах при температуре эталона, равной 0 °С. Эта величина воспроизводится с высокой точностью во всех палатах мер и весов и размножается в виде вторичных эталонов.

Пространственные размеры в физике изменяются в пределах от 10^{-15} м — размера атомного ядра, до 10^{25} м — ориентировочного размера видимой части Вселенной.

Современные измерительные системы определения больших и малых расстояний используют последние достижения физики, и эталоном длины является длина волны излучения определенного типа атомов.

Как измерить время? Ответ простой — посмотреть на часы. А что такое часы?

Для измерения промежутка времени необходимо иметь *эталонный периодический процесс*, т. е. процесс, в котором периодически и с высокой точностью воспроизводится одна и та же последовательность состояний какой-либо системы. Кроме того, нужно иметь *счетчик циклов*, фиксирующий число повторений одинаковых состояний системы. Тогда промежуток времени будет определяться числом циклов или периодов изменений системы, *выбранной за эталонную*.

Если t — промежуток времени, который мы хотим определить, а τ — период определенного циклического эталонного процесса, то

$$\frac{t}{\tau} = n, \quad t = n\tau.$$

С древности и до середины XX в. эталонным циклическим процессом выбиралось суточное вращение Земли вокруг своей оси,

а единицей измерения времени являлась $\frac{1}{86\,400}$ доля одного полного

оборота Земли вокруг своей оси — 1 секунда (1 с).

Устройство, которое мы носим на руке, — часы — реализует вторичный циклический процесс, строго синхронизированный с периодом суточного обращения Земли.

Если рассматривать ось времени t и зафиксировать на ней времена каких-то двух событий A (t_A) и B (t_B) по отношению к некоторому начальному моменту $t = 0$, то можно сделать следующие выводы:

- t_A и t_B зависят от выбора начала отсчета;
- $\Delta t = t_B - t_A$ — промежуток времени между двумя событиями — не зависит от выбора нулевой точки отсчета, т. е. является инвариантом шкалы времени, это объективная временная характеристика последовательности событий.

Промежутки времени в физике изменяются в пределах от 10^{-20} с — времени жизни некоторых элементарных частиц, до 10^{17} с — примерного возраста Вселенной.

Замечание. Представления о пространстве и времени, которые мы рассмотрели, используются при описании весьма широкого круга явлений — движения предметов на Земле и в ее окрестностях, движение небесных тел, жидкостей, колебательных и волновых движений, в молекулярной физике и т. д. — это **классическая физика** малых скоростей. Однако помимо классической физики существует еще и так называемая **релятивистская физика** — физика больших скоростей. Что значит «больших»? Это означает движение со скоростями, близкими к скорости света, т. е. скорости распространения электромагнитных волн $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Макроскопические тела невозможно разогнать до таких скоростей, только элементарные частицы в современных ускорителях могут двигаться со скоростями, близкими к скорости света.

В начале XX в. А. Эйнштейном — создателем так называемой специальной теории относительности — было показано, что если макроскопическое тело движется со скоростью v , близкой к скорости света c , то изменяются его размеры в направлении движения

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (1.1)$$

и в системе координат, жестко связанной с этим телом, время течет медленнее

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (1.2)$$

Видно, что поскольку l и Δt — действительные величины, всегда $v < c$, и скорость света — максимально возможная скорость, с которой могут перемещаться в пространстве материальные тела.

Так как $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$, для тела, движущегося со скоростью v , l уменьшается, а Δt увеличивается. Поскольку реально достижимые скорости движения материальных тел (для самолета $v \approx 1000$ км/ч ≈ 300 м/с, для пули $v \approx 800$ м/с, для спутника $v \approx 8000$ м/с) на много порядков меньше скорости света, при анализе их движения можно не учитывать малые («релятивистские») поправки.

Определившись с понятиями пространства и времени, проведем анализ движения простейшего тела — материальной точки. Будем интересоваться пока только кинематикой движения — количественным описанием самого движения без рассмотрения причин,

его вызывающих. Кинематическая задача требует введения ряда характеризующих движение понятий:

- закон движения точки;
- траектория движения;
- вектор перемещения;
- вектор мгновенной скорости;
- пройденный путь;
- вектор ускорения.

Пусть точка M движется по произвольной криволинейной траектории (рис. 1.2). В каждый момент времени положение точки определяется координатами x , y , z .

Закон движения определяется либо в координатной форме, как зависимость координат от времени $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$, либо в векторной форме: $\vec{r} = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k}$. Конец вектора \vec{r} , проведенного из начала координат, указывает положение точки в каждый момент времени.

Линия, по которой движется точка, — это ее траектория. **Траектория** — это геометрическое место точек, которые занимает конец радиуса-вектора во время движения точки.

Чтобы найти уравнение траектории, из уравнений закона движения нужно исключить время.

Пример 1.1. Рассмотрим криволинейное движение в плоскости $x = 0$. Пусть зависимость от времени координат точки — закон ее движения — задается уравнениями

$$x = 0; \quad (1.3)$$

$$y = y(t) = bt; \quad (1.4)$$

$$z = z(t) = z_0 - at^2/2. \quad (1.5)$$

Здесь a , b , z_0 — постоянные величины; t — время. Видно, что в начальный момент времени ($t = 0$) координаты точки $x = 0$, $y = 0$, $z = z_0$.

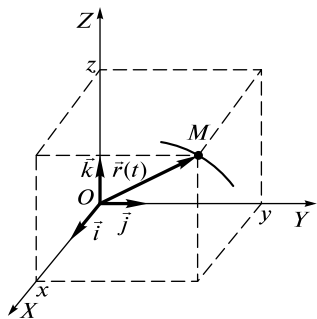


Рис. 1.2

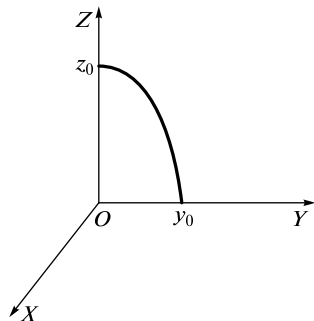


Рис. 1.3

Из уравнения (1.4) имеем $t = y/b$; подставляя t в уравнение (1.5), получаем уравнение траектории в виде

$$z = z_0 - ay^2/2b^2.$$

Форма траектории показана на рис. 1.3, $y_0^2 = \frac{2b^2}{a} z_0$.

1.4. Мгновенная скорость

В быту скорость — это путь, который проходит тело, частица, точка в единицу времени. Если за любые равные промежутки времени Δt точка проходит одинаковый по длине отрезок траектории Δs , то говорят о равномерном движении со скоростью $v = \Delta s/\Delta t$.

В физике скоростью называют векторную величину, характеризующую не только быстроту перемещения частицы, но и направление, по которому движется частица в каждый момент времени. Таким образом вводится понятие вектора **мгновенной скорости**.

Пусть в момент времени t_1 материальная точка находится в точке M , в момент времени t_2 — в точке N . За время $\Delta t = t_2 - t_1$ точка проходит отрезок траектории MN и получает перемещение $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$,

где $\Delta \vec{r}$ — **вектор перемещения** точки (рис. 1.4). Величина $\vec{v}_{\text{cp}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ —

вектор средней скорости за время Δt . Если брать все меньшие промежутки времени Δt , то это отношение в пределе даст значение мгновенной скорости в любой момент времени t :

$$\vec{v} = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ t_2 \rightarrow t_1}} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Мгновенная скорость — это вектор, равный производной радиус-вектора точки по времени.

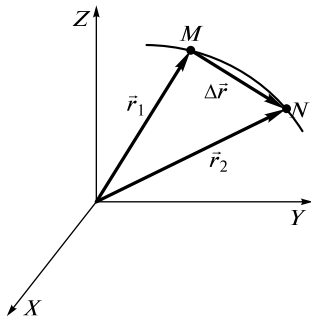


Рис. 1.4

Видно, что путь ΔS между точками M и N на криволинейной траектории отличен от $|\Delta \vec{r}|$ — модуля вектора перемещения. Однако при $\Delta t \rightarrow 0$ различие между ΔS и $|\Delta \vec{r}|$ будет убывать, и в конце концов для бесконечно малых величин $dS = |d\vec{r}|$, т. е.

$$|\vec{v}| = \frac{|d\vec{r}|}{dt} = \frac{dS}{dt}$$

— модуль мгновенной скорости равен производной пути по времени. Вектор \vec{v} направлен так же, как и $d\vec{r}$, т. е. по касательной к траектории.

Таким образом, приходим к следующим выводам:

- вектор мгновенной скорости $\vec{v}(t)$ направлен всегда по касательной к траектории;
- для бесконечно малого перемещения вектор $d\vec{r}$ просто совпадает с элементом траектории. Для модуля мгновенной скорости

$$|\vec{v}| = v = \frac{dS}{dt}.$$

Зная скорость в каждый момент времени, можно определить путь, пройденный частицей вдоль траектории от момента t_1 до момента t_2 . Разобьем промежуток времени $t_2 - t_1$ на n малых равных промежутков $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$, тогда весь путь

$$S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \dots = \sum_{i=1}^n \Delta S_i,$$

где ΔS_i — элемент пути, пройденный за промежуток времени Δt_i .

Каждое из слагаемых может быть приближенно представлено как $\Delta S_i = v_i \Delta t_i$, где v_i — одно из значений скорости в интервале Δt_i , т. е.

$S \approx \sum_{i=1}^n v_i \Delta t_i$; точное равенство получим, если перейдем к пределу при

$$\Delta t \rightarrow 0: S = \lim_{\Delta t_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n v_i \Delta t_i = \int_{t_1}^{t_2} v dt, \text{ где } v \text{ — модуль мгновенной скорости.}$$

Если, например, мгновенная скорость линейно возрастает с течением времени от $t = 0$ до t_1 как $v = at$ (a — постоянный коэффициент),

$$\text{то } S = \int_0^{t_1} at dt = \frac{at^2}{2} \text{ — формула, известная из школьного курса физики}$$

(«равноускоренное движение»), a — ускорение; точное определение этой величины будет дано далее.

Мгновенная скорость точки определяется законом движения:

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}(t)}{dt} = \vec{i} \frac{dx(t)}{dt} + \vec{j} \frac{dy(t)}{dt} + \vec{k} \frac{dz(t)}{dt} = \vec{i}v_x + \vec{j}v_y + \vec{k}v_z,$$

где v_x, v_y, v_z — компоненты вектора мгновенной скорости по координатным осям.

Для модуля этого вектора имеем:

$$|\vec{v}| = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}.$$

Для примера 1.1 (см. уравнения (1.3) — (1.5)) компоненты вектора мгновенной скорости определяются так: $v_x = 0, v_y = \frac{dy}{dt} = b, v_z = \frac{dz}{dt} = -at$; модуль вектора скорости $|\vec{v}| = \sqrt{b^2 + a^2 t^2}$.

Глава 2

ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ ПО ОКРУЖНОСТИ. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАЛИЛЕЯ

2.1. Равномерное движение точки по окружности. Угловая скорость

Пусть в плоскости XOY точка M движется по окружности радиуса r вокруг оси z (рис. 2.1). Положение точки определяется углом φ , отсчитываемым от оси OX . Таким образом, радиус-вектор точки $\vec{r} = \vec{r}(t) = x\vec{i} + y\vec{j}$, $r = |\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2} = \text{const}$, здесь

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi; & (2.1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} y = r \sin \varphi; & (2.2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} z = 0. & (2.3) \end{cases}$$

Сначала рассмотрим *равномерное движение точки по окружности*. Это значит, что угол поворота φ радиуса-вектора пропорционален времени t : $\varphi \sim t$, т. е. $\varphi = \omega t$, $\omega = \text{const}$ — коэффициент пропорциональности, который можно назвать угловой скоростью. Эта величина измеряется в единицах рад/с. Если полный оборот совершается за время T , то $\omega = \frac{2\pi}{T}, \frac{1}{T} = \nu$, здесь T — период вращения; ν — частота вращения.

В общем случае угловая скорость определяется как $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$, при равномерном вращении $\omega = \text{const}$, и точка движется по окружности с постоянной по модулю скоростью.

Как связана угловая скорость с линейной? Дифференцируя (2.1) и (2.2) по времени, имеем:

$$\begin{cases} v_x = -r\omega \sin \omega t; \\ v_y = r\omega \cos \omega t, \end{cases}$$

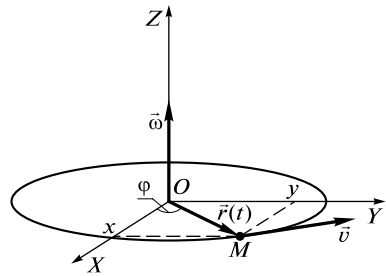
откуда $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = r\omega$ — соотношение, связывающее линейную и угловую скорости.

Угловую скорость ω можно определить как вектор, который будет задавать:

- значение угловой скорости;
- положение оси, вокруг которой происходит вращение;
- направление вращения (по или против часовой стрелки).

Рис. 2.1

Для этого условимся изображать угловую скорость отрезком прямой, лежащей на оси OZ , вокруг которой происходит вращение; пусть длина отрезка в некотором масштабе равна ω (см. рис. 2.1). Будем приписывать этому отрезку направление, связанное с направлением вращения радиуса-вектора \vec{r} правилом правого винта, т. е. в векторной форме $\vec{v} = [\vec{\omega} \cdot \vec{r}]$. Квадратные скобки означают, как всегда, векторное произведение.



Если угловую скорость точки, движущейся по заданной окружности, описать вектором $\vec{\omega}$, направленным вдоль оси вращения и имеющим значение, равное численному значению угловой скорости, то этот вектор определит и направление оси, вокруг которой происходит вращение.

Из двух направлений вдоль оси OZ за направление вектора $\vec{\omega}$ принимается то, в котором движется правый винт, установленный параллельно оси и вращающийся в ту же сторону, что и точка на окружности.

Поскольку $v = r\omega$, при $\omega = \text{const}$ линейная скорость уменьшается с приближением точки M к оси вращения.

То, что угловая скорость действительно подчиняется закономерностям, которые определяют свойства векторов, можно продемонстрировать на следующем примере (рис. 2.2). Белый глобус, покрытый

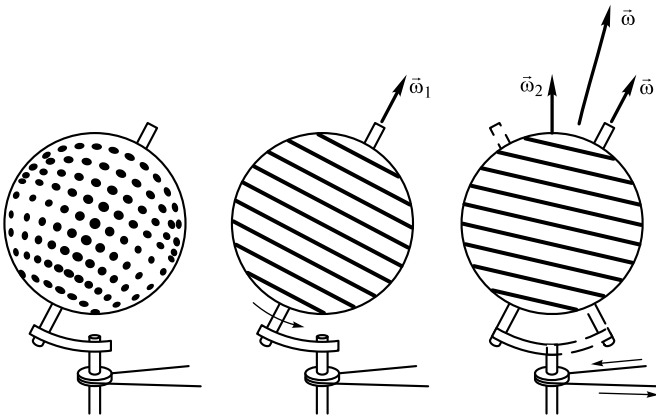


Рис. 2.2