Р. И. ГРАБОВСКИЙ

Курс физики

(для сельскохозяйственных институтов)

ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов
сельскохозяйственных специальностей
высших учебных заведений

Москва «Высшая школа» 1980

ББК 22.3
Г75
УДК 53

Рецензент:
кафедра физики БСХА (зав. кафедрой — доц. *А. П. Авдеенко*)

Грабовский Р. И.

Г75 Курс физики (для сельскохозяйственных институтов): Учеб. пособие. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. школа, 1980. — 607 с., ил.

В пер.: 1 р. 50 к.

Пособие составлено в соответствии с программой по физике для сельскохозяйственных институтов. Данный «Курс физики» отражает новейшие достижения физической науки и техники и содержит богатый физический материал из области приложения физики к агрономической науке и практике. Пятое издание (четвертое вышло в 1974 г.) несколько дополнено: увеличено число примеров, иллюстрирующих применение физических закономерностей к агрономическим объектам, введена система контрольных вопросов.

Предназначается для студентов сельскохозяйственных вузов. Может быть использовано заочниками.

$Г\frac{20401-455}{001(01)-80}$ 32—80 1704010000 53
ББК 22.3

ПРЕДИСЛОВИЕ

В данном «Курсе физики», предназначенном для студентов стационара и заочного отделения агрономических, зооветеринарных и лесотехнических факультетов сельскохозяйственных вузов, изложены теоретические основы общей физики, предусмотренные программой. Избыточный (сверхпрограммный) материал выделен петитом. Для студентов инженерных факультетов сельскохозяйственных институтов «Курс физики» может служить, так сказать, *учебником -минимумом* при условии использования материала, данного петитом, и получения дополнительных сведений по некоторым отдельным вопросам на лекциях.

На упомянутых *агробиологических* факультетах курс физики проходят за короткий срок (один учебный год) при небольшом количестве учебных часов (около 80 лекционных и 80 лабораторно-практических часов). Математическая подготовка студентов определяется кратким курсом высшей математики, читаемым *одновременно* с курсом физики.

В связи с этим предлагаемое учебное пособие написано с применением аппарата высшей математики, не выходящим, как правило, за пределы табличных формул производных и интегралов. Выводы некоторых физических закономерностей даются в упрощенном виде или носят характер качественно-теоретических обоснований. Вместе с тем пришлось в основном отказаться от исторических обзоров, описания физической аппаратуры и методов измерения, а также от систематического изложения материала, входящего в курс физики средней школы. Повторение отдельных вопросов школьного курса имеет место лишь в той мере, в какой это необходимо для связности изложения.

Чтобы облегчить чтение книги студентам-заочникам, во «Введении» (см. § 3) даются необходимые сведения о некоторых математических понятиях и символах, применяемых в пособии, но не встречающихся в школьных курсах физики и математики*. С этой же целью книга снабжена значительным количеством рисунков и подробным предметным указателем.

Многие примеры, иллюстрирующие рассматриваемые физические закономерности, взяты из областей, связанных с агробиологическими науками и сельскохозяйственным производством. Это относится и к разобранным задачам, которые введены в конце параграфов.

В пособии применяется только Международная система (СИ) с ее кратными и дольными единицами; наряду с ними используется лишь небольшое количество наиболее употребительных внесистемных единиц (минута, час, литр, градус Цельсия, электронвольт). Все формулы раздела «Электричество и магнетизм» приведены в рационализованном виде; нерационализованный вид этих формул дан только в приложении.

---

* Хотя новая программа предусматривает расширение школьного курса математики, в частности, введение в него элементов высшей математики, следует учесть, что в течение ближайшего пятилетия на заочное отделение институтов будут в основном поступать лица, изучавшие математику по старой школьной программе. Поэтому в настоящем издании § 3 сохранен и даже дополнен.

Настоящее, пятое, издание пособия отличается от предыдущего значительными по объему изменениями и дополнениями. В нем более широко представлены положения квантовой и релятивистской теорий, причем эти положения не сосредоточены в конце книги, а распределены по всему курсу. Переработано и дополнено изложение ряда разделов и вопросов (сложения гармонических колебаний, экспериментальные газовые законы, электронная теория проводимости металлов, полупроводники, фотосинтез, законы излучения абсолютно черного тела, строение многоэлектронных атомов и др.). Увеличено количество примеров применения физических закономерностей к биологическим и агротехническим объектам.

Кроме того, введена система контрольных вопросов по завершенным разделам учебника с ответами на них в конце книги. Эти вопросы в подавляющем большинстве несложные. Однако они составлены так, что охватывают все основные положения курса физики, и потому введенная система дает возможность читателю проверить, усвоен ли им проработанный материал, и выяснить, что из этого материала следует проработать повторно. К тому же ответы на некоторые вопросы дополняют и углубляют содержание основного текста учебника. В этой связи настоятельно рекомендуем студентам переходить к изучению последующего раздела только после того, как они дадут правильные и вполне осознанные ответы на все контрольные вопросы предыдущего раздела.

Автор будет признателен кафедрам физики и отдельным лицам за рекомендации по дальнейшему совершенствованию учебного пособия, которые просит направлять в издательство «Высшая школа».

Р. Грабовский

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Предмет физики. Связь физики с другими науками и производством

Мир, окружающий нас, материален: он состоит из вечно существующей и непрерывно движущейся материи. Материей в широком смысле слова называется все, что реально существует в природе (Вселенной) и может быть обнаружено человеком посредством органов чувств или с помощью специальных приборов. «Материя есть философская категория для обозначения объективной реальности, которая дана человеку в ощущениях его, которая копируется, фотографируется, отображается нашими ощущениями, существуя независимо от них»*. Конкретные виды материи многообразны. К ним относятся *элементарные частицы* (электроны, протоны, нейтроны и др.), совокупности небольшого числа этих частиц (атомы, молекулы, ионы), *физические тела* (совокупности множества элементарных частиц) и *физические поля* (гравитационные, электромагнитные и др.), посредством которых взаимодействуют различные материальные частицы.

Неотъемлемым свойством материи является *движение*, под которым следует понимать все изменения и превращения материи, все процессы, протекающие в природе. «Движение, рассматриваемое в самом общем смысле слова, т. е. понимаемое как форма бытия материи, как внутренне присущий материи атрибут, обнимает собою все происходящие во Вселенной изменения и процессы, начиная от простого перемещения и кончая мышлением»**.

Разнообразные формы движения материи исследуются различными науками, в том числе и *физикой****. *Физика изучает наиболее*

* Ленин В. И. Соч., т. 18, с. 131.

** Энгельс Ф. Диалектика природы, 1955, с. 44.

*** Слово «физика» имеет греческое происхождение: φυσισ (физис)—природа. Так было названо большое сочинение древнегреческого ученого Аристотеля, написанное в III в. до н. э. и содержащее все имевшиеся к тому времени сведения о природе (сведения по геометрии, астрономии, земледелию, медицине, ботанике и т. д.). Таким образом, первоначально физика включала в себя все естественные науки. Со временем эти науки выделились из физики.

простую и вместе с тем наиболее общую форму движения материи: механические, атомно-молекулярные, гравитационные, электромагнитные, внутриатомные и внутриядерные процессы. Эти разновидности *физической* формы движения являются наиболее общими потому, что содержатся во всех более сложных формах движения материи, изучаемых другими науками. Например, процессы жизнедеятельности организмов, изучаемые биологией, всегда сопровождаются механическими, электрическими, внутриатомными и другими *физическими* процессами (но, конечно, не сводятся к этим процессам). Таким образом, можно сказать, что *предмет исследования физики составляют общие закономерности явлений природы.*

Этим, однако, не исчерпывается связь физики с другими науками. Физика позволяет создавать приборы и вырабатывать методы исследования, необходимые для успешного развития всех естественных и прикладных наук. Трудно переоценить значение, которое имели, например, микроскоп в развитии биологии, телескоп — в астрономии, спектральный анализ — в химии, рентгеновский анализ — в медицине и т. п. Все естественные и прикладные науки широко и плодотворно применяют теперь метод меченых атомов, электронную аппаратуру и другие физические приборы и методы исследования. Почти все эти науки имеют сейчас специальные *физические* разделы: астрофизика — в астрономии, физическая химия — в химии, биофизика — в биологии, агрофизика — в агрономии, электрофизика — в электротехнике, металлофизика — в металловедении и т. д. Можно поэтому утверждать, что *физика является фундаментом, на котором строятся все естественные и прикладные науки*.

Следует отметить, что связь физики с другими науками *взаимна*: развиваясь с помощью физики, эти науки обогащают физику своими достижениями и ставят перед нею новые задачи, разрешая которые физика развивается и совершенствуется сама.

По предмету и методу своих исследований физика тесно связана с философией и способствует формированию материалистического мировоззрения. Методом физических исследований является *материалистическая диалектика*. Этот метод исходит из признания материи единственной основой мира, рассматривая сознание как свойство высокоорганизованной материи — человеческого мозга — отражать объективный мир. Метод материалистической диалектики предполагает изучение всех явлений окружающего нас мира (в том числе и физические явления) в их взаимосвязи и взаимодействии, в их развитии и изменении путем перехода количества в качество, обусловленного борьбой внутренних противоречий (противоположностей), заложенных в этих явлениях.

Всякое физическое исследование начинается с *наблюдения*, т. е. с изучения физических явлений и естественной, природной, обстановке. Затем на основании размышлений и логических обобщений высказывается рабочая *гипотеза* — научное предположение, объясняющее эти явления. Гипотеза проверяется *экспериментом*, т. е. изучением явлений путем их воспроизведения в искусственных, лабораторных условиях. Гипотеза, подтвержденная экспериментом, становится научной *теорией*, которая в дальнейшем подвергается неоднократной проверке *практикой*, вносящей в теорию необходимые дополнения и уточнения.

Сущность подобного метода исследований может быть выражена кратко следующими словами В. И. Ленина: «От живого созерцания к абстрактному мышлению *и от него к практике* — таков диалектический путь познания истины, познания объективной реальности»*.

Физика оказывает весьма большое влияние на развитие производства как через соответствующие естественные науки, так и непосредственно. Достаточно напомнить, что физика дала производству электроэнергетику, все виды транспорта, радиосвязь, телевидение, ядерную энергетику и т. д.

Учитывая назначение данного курса, уместно несколько подробнее отметить роль физики в сельскохозяйственном производстве. Еще в 1788 г. один из основателей отечественной агрономии И. М. Комов писал в книге «О земледелии», что земледелие же и с высокими науками тесный союз имеет, каковы суть история естественная, наука лечебная, химия, механика и почти вся физика, и *само оно не что есть иное, как часть физики опытной*, только всех полезнейшая** . В течение многих лет большим энтузиастом в деле внедрения физики в сельское хозяйство был один из крупнейших советских физиков — акад. *А. Ф. Иоффе*.

Не останавливаясь на таких общеизвестных вопросах, как механизация, электрификация и автоматизация сельскохозяйственного производства и внедрение во все его отрасли современной контрольно-измерительной аппаратуры, укажем на некоторые специфические направления творческого содружества физики с сельским хозяйством.

Процессы жизнедеятельности сельскохозяйственных растений в значительной мере определяются *физическими условиями* среды, в которой развивается растение: световым, тепловым, водным и воздушным режимами. Задача физики состоит в изучении этих условий и установлении наиболее благоприятных режимов для роста сельскохозяйственных культур***. Не менее важным является решение аналогичной задачи применительно к сельскохозяйственным животным.

Для повышения урожайности сельскохозяйственных культур и продуктивности животноводства большое значение имеет изучение проблемы фотосинтеза и исследование методом меченых атомов процессов питания растений и животных.

---

* Ленин В. И. Соч., т. 29, с. 152—153.

** Курсив наш.

*** Отметим в этой связи, что на территории Главного ботанического сада АН СССР создан первый советский *фитотрон* (станция искусственного климата), имеющий весьма большое значение для изучения устойчивости растений к морозам, засухе, суховеям, засоленности почв и т. п. Теперь в нашей стране функционирует уже большое количество фитотронов. Наиболее крупные из них построены в Одессе и Новосибирске.

Для изменения наследственности сельскохозяйственных животных и растений и стимулирования их роста весьма перспективными являются исследования по воздействию на живые организмы таких физических факторов, как ультразвуковые колебания, различного рода радиоактивные излучения, электромагнитные волны и т. п.

Актуальной агрофизической проблемой является разработка физических приемов улучшения структуры почвы (например, закрепление песков) и прогрессивных методов обработки земли (скоростная вспашка, применение виброплугов и т. п.).

При изложении настоящего курса роль физики в сельскохозяйственном производстве будет по мере возможности раскрываться. Однако уже из приведенного, далеко не полного перечня агрофизических проблем и задач очевидно, что *современный агроном или зоотехник должен хорошо знать основы физики и уметь творчески применять физические закономерности в своей практической деятельности.*

§ 2. Единицы и размерности физических величин

Большинство физических законов представляется в виде формул, связывающих числовые значения различных физических величин. Для получения этих значений необходимо *измерять* физические величины. Измерение физической величины сводится к сравнению ее с *однородной* физической величиной, принятой за единицу. Для каждой физической величины эту единицу можно выбирать совершенно произвольно, независимо от других величин. Однако на практике в целях удобства поступают иначе. Произвольно выбирают единицы только для нескольких (семи) физических величин. Эти величины и их единицы называют *основными*. Единицы всех остальных физических величин устанавливают на основании законов (формул), связывающих эти величины с основными. Такие величины и их единицы называют *производными*.

Совокупность всех основных и производных единиц физических величин называется *системой единиц*.

В СССР утверждена Международная система единиц — СИ (система интернациональная). Основными физическими величинами СИ являются *длина*, *масса*, *время*, *термодинамическая температура Кельвина*, *сила электрического тока*, *сила света и количество вещества*. За основные единицы приняты соответственно следующие семь: *метр* (м), *килограмм* (кг), *секунда* (с), *кельвин* (К), *ампер* (А), *кандела* (кд) и *моль* (моль)*.

Производные единицы устанавливаются указанным ранее способом. Например, на основании известной формулы равномерного прямолинейного движения

$$v = st,$$

---

* Отметим, что применявшаяся ранее система МКС (практическая) является *частью* СИ.

где s — путь, t — время, единица скорости оказывается равной 1 м/с.

Ранее наряду с СИ применялась физическая система (СГС), основными единицами которой являлись *сантиметр* (см), *грамм* (г) и *секунда* (с).

Более подробно единицы будут рассматриваться на протяжении всего курса при ознакомлении с соответствующими физическими величинами. Кроме того, в приложении II дана сводная таблица единиц физических величин, *приведены точные определения основных единиц Международной системы и даны необходимые к ним разъяснения.*

Единицы любой производной физической величины можно выразить через основные (пользуясь формулами, связывающими производную величину с основными). Иначе говоря, любую физическую величину можно выразить в основных единицах. Выражение физической величины в основных единицах называется *размерностью физической величины**. Поясним это на примере работы A.

Единицей работы является джоуль. Для определения размерности работы выразим ее через основные физические величины — путь s, массу m и время t:

$$A = Fs = mas = mvs/t = ms^2/t^2,$$

где F — сила, a — ускорение. Подставив в правую часть полученного равенства вместо основных физических величин их единицы в СИ, получим размерность работы в этой системе: кг·м²/с². Результат определения размерности физической величины принято записывать условным равенством, в котором эта величина заключается в квадратные скобки. Применительно к нашему примеру это равенство записывается так:

$$[A] = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}.$$

Размерности обеих частей физических равенств должны быть одинаковыми. Это положение позволяет проверять правильность любых физических формул, в частности формул, получаемых при решении задач. Проверим, например, формулу пути равноускоренного движения

$$s = v_0 t + at^2/2$$

---

* Строго говоря, размерностью физической величины называются показатели степени в символическом уравнении, выражающем эту величину через основные физические величины. Например, размерность работы

$$[A] = M^1 L^2 T^{-2},$$

где M — символ массы, L — символ длины, T — символ времени.

Однако теперь, в связи с переходом к Международной системе единиц физических величин (СИ), вполне допустимо и в известной мере даже целесообразно вместо символов основных физических величин пользоваться обозначениями основных единиц.

(v_0 — начальная скорость, a — ускорение):

$$[s] = \text{м}; \quad [v_0 t] = \frac{\text{м}}{\text{с}}\,\text{с} = \text{м}; \left[\frac{at^2}{2}\right] = \frac{\text{м}}{\text{с}^2}\,\text{с}^2 = \text{м}.$$

Кроме того, размерность помогает глубже уяснить физический смысл формул. Рассмотрим в этом плане, например, закон Бойля—Мариотта:

$$pV = \text{const},$$

где p — давление, V — объем данной массы газа при постоянной температуре. Определим размерность левой части этого уравнения:

$$[pV] = (\text{Н}/\text{м}^2) \cdot \text{м}^3 = \text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2.$$

Это есть размерность энергии (или работы). Следовательно, более глубокий физический смысл закона Бойля—Мариотта состоит в том, что *при изотермическом процессе энергия (внутренняя) газа остается неизменной.*

Таким образом, размерность играет немаловажную роль при анализе физических закономерностей*.

§ 3. Некоторые математические понятия и символы

С самого начала и на протяжении всего курса мы будем пользоваться некоторыми математическими символами и понятиями, не встречавшимися (или редко применявшимися) в школьном курсе физики. Дадим необходимые в этой связи пояснения.

▲ ЗНАКИ МАЛОСТИ, НЕРАВЕНСТВА, ПРИБЛИЖЕННОГО РАВЕНСТВА И ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ

Для обозначения малых величин (или малых изменений величин) принято ставить перед ними знак Δ. Например, Δm — малая масса, Δt — малый промежуток времени и т. д.

Помимо общеизвестных знаков неравенства $>$ и $<$ употребляются знаки $\neq$ (не равно), $\gg$ (гораздо больше) и $\ll$ (гораздо меньше).

Для обозначения приближенного равенства применяется знак $\approx$ Например, радиус Земли $R \approx 6400$ км.

Для выражения пропорциональной зависимости служит знак $\sim$.

▲ НАТУРАЛЬНЫЕ ЛОГАРИФМЫ

Наряду с десятичными логарифмами (log) применяются натуральные логарифмы (ln), основанием которых служит иррациональное число e $\approx$ 2,71828. Переход от десятичного логарифма к натуральному совершается по формуле $\ln N \approx 2{,}31 \log N$.

---

* Посредством размерностей можно даже выводить некоторые физические формулы с точностью до безразмерного коэффициента (теория размерностей).

▲ АБСОЛЮТНОЕ ЗНАЧЕНИЕ И ПОРЯДОК ВЕЛИЧИНЫ

Абсолютным значением величины называется ее значение, взятое с положительным знаком; условно обозначается посредством заключения величины в прямые скобки. Если, например, ускорение $a = -4$ см/с^2, то абсолютное значение ускорения $|a| = 4$ см/с^2.

Порядком величины называется ближайшее к ее значению число, которое может быть выражено в виде 10^n. Например, ускорение свободного падения $g = 981$ см/с^2 имеет порядок 10^3 см/с^2, длина световой волны $\lambda = 0{,}000045$ см имеет порядок 10^{-5} см и т. п.

▲ СИМВОЛИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ СУММЫ

Сумму большого числа однородных величин

$$a_1 + a_2 + a_3 + \cdots + a_{n-1} + a_n$$

принято записывать сокращенно с помощью знака Σ следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{i=n} a_i, \text{ или } \sum_{1}^{n} a_i .$$

Стоящие при знаке суммы числа 1 и n (пределы суммирования) показывают, что надо складывать все a_i подряд, начиная с a_1 и кончая a_n.

▲ СПОСОБЫ УСРЕДНЕНИЯ ВЕЛИЧИН

Существует несколько способов вычисления среднего значения величины по нескольким (n) отдельным ее значениям $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$. Мы будем пользоваться:

а) *средним арифметическим* значением величины называется сумма отдельных значений величины, деленная на их число:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n}{n} = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} x_i;$$

б) *средним геометрическим* значением величины называется корень n-й степени из произведения n отдельных ее значений:

$$\tilde{x} = \sqrt[n]{x_1 x_2 x_3 \ldots x_n};$$

в) *средним квадратичным* значением величины называется квадратный корень из суммы квадратов отдельных значений величины, деленной на их число:

$$x^* = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \cdots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{1}^{n} x_i^2}.$$

Результаты усреднения, полученные этими способами, обычно мало отличаются один от другого (но все же $x^* > \langle x \rangle > \tilde{x}$).

▲ ЛИНЕЙНЫЕ ОПЕРАЦИИ НАД ВЕКТОРАМИ

Все физические величины подразделяются на две группы: *скалярные* (*скаляры*) и *векторные* (*векторы*).

Скалярная величина полностью определяется *числовым значением*. Скалярами являются, например, время, площадь, масса, работа. Действия над скалярами производятся по правилам алгебры, дифференциального и интегрального исчислений.

Рис. 1

Векторная величина полностью определяется *числовым значением* и *направлением*. Векторами являются, например, скорость, ускорение, сила. В отличие от скаляров векторы обозначаются полужирными буквами или буквами со стрелкой сверху*. Например, **v** — вектор скорости, **F** — вектор силы и т. п. Графически вектор изображают отрезком со стрелкой на конце. Длина отрезка соответствует (в произвольном масштабе) числовому значению вектора; стрелка указывает направление вектора. На рис. 1 изображен вектор силы тяжести **P**, числовое значение которого 4 Н (*ньютон*).

Векторы, имеющие одинаковые модули и направления, равны между собой. Отсюда следует, что при параллельном переносе вектор не изменяется.

Два численно равных, но противоположно направленных вектора **A** и **B** называются *противоположными*. Для них

$$\mathbf{A} = -\mathbf{B}, \quad \text{или} \quad \mathbf{B} = -\mathbf{A}.$$

Действия над векторами производятся по правилам векторного исчисления. Ознакомимся с некоторыми из них.

1. *Сложение векторов* производится по *правилу параллелограмма*.

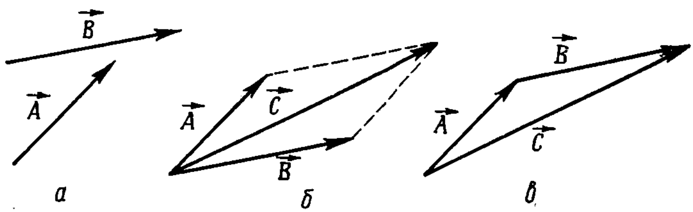


Рис. 2

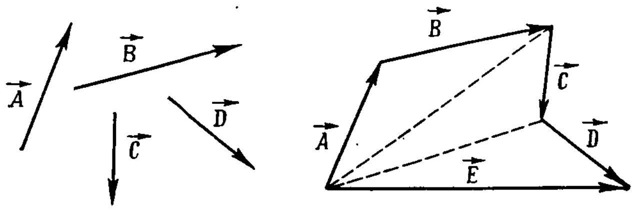
Чтобы сложить два вектора **A** и **B** (рис. 2, *а*), необходимо путем параллельного переноса совместить их начала и построить на век-

* В тексте векторные величины обозначены полужирными буквами, на рисунках — буквами со стрелкой сверху.

торах параллелограмм (рис. 2, *б*). Вектор **C**, являющийся диагональю параллелограмма, представляет собой искомую сумму:

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} = \mathbf{C}.$$

Векторы можно сложить и другим способом, совмещая начало второго вектора с концом первого. Вектор **C**, соединяющий начало первого вектора с концом второго, также представляет искомую сумму (рис. 2, *в*). Этот способ, называемый *правилом треугольника*, особенно удобен при сложении нескольких векторов, на-



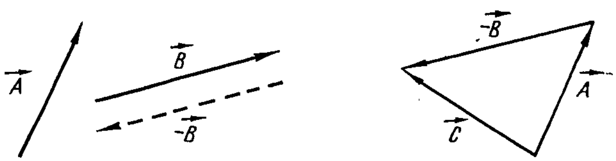
а *б*

Рис. 3

пример четырех: **A**, **B**, **C** и **D** (рис. 3, *а*). В этом случае начало второго вектора совмещают с концом первого, начало третьего — с концом второго и т. д. (рис. 3, *б*). Вектор **E**, соединяющий начало первого вектора с концом последнего, является суммой данных векторов:

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} + \mathbf{D} = \mathbf{E}.$$

Он не зависит от последовательности, в которой производилось сложение векторов, в чем легко убедиться путем соответствующих построений.



а *б*

Рис. 4

2. *Вычитание вектора* **B** *из вектора* **A** можно заменить сложением **A** с вектором (—**B**), противоположным **B** (рис. 4, *а*):

$$\mathbf{A} - \mathbf{B} = \mathbf{A} + (-\mathbf{B}) = \mathbf{C}.$$

Тогда, применив правило треугольника, получим вектор разности **C** (рис. 4, *б*).

3. *Умножение и деление вектора на скаляр.* При умножении вектора **A** на скаляр *n* получается вектор, совпадающий по направлению

с A и равный по модулю nA. Скаляр n может иметь любые значения (целые и дробные, положительные и отрицательные). Поэтому данное правило умножения является вместе с тем и правилом деления вектора на скаляр. Примером умножения вектора на скаляр может служить определение перемещения $\mathbf{s}$ по скорости $\mathbf{v}$ и времени t (при равномерном прямолинейном движении):

$$\mathbf{v}t = \mathbf{s}.$$

Примером деления вектора на скаляр является определение ускорения $\mathbf{a}$ по силе $\mathbf{F}$, действующей на тело, и массе m тела:

$$\mathbf{F}/m = \mathbf{a}.$$

▲ ГРАДИЕНТ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Если некоторая физическая величина имеет в каждой точке пространства определенное (иное, чем в других точках) значение, то говорят, что эта величина *распределена в пространстве*. Простран-

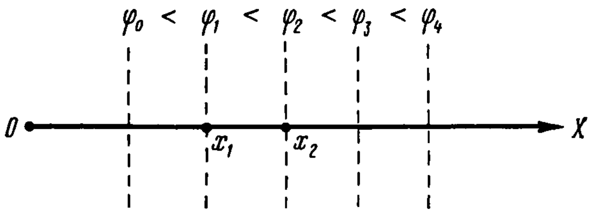


Рис. 5

ственно распределенным является, например, атмосферное давление: в различных точках атмосферы его значения различны.

Если пространственно распределенная физическая величина φ возрастает в некотором направлении OX, то «*пространственную быстроту*» ее возрастания удобно характеризовать отношением изменения $\Delta\varphi$ к расстоянию Δx, на котором это изменение происходит (рис. 5). Ось OX располагают в направлении *максимального возрастания* φ; расстояние Δx следует брать возможно меньшим. Отношение

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta x} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{x_2 - x_1}$$

является градиентом физической величины φ и обозначается так:

$$\operatorname{grad}\varphi = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x}.$$

Градиентом физической величины называется отношение ее изменения к расстоянию, на котором оно осуществляется, взятом в направлении наибольшего возрастания физической величины.

Следовательно, градиент есть вектор, направленный в сторону наибольшего возрастания физической величины.

Понятие градиента применимо к любой физической величине (скорости, плотности, температуре, давлению и т. д.), если только она имеет пространственное распределение. Размерность градиента равна размерности физической величины, деленной на размерность длины. Например, размерность градиента скорости

$$[\mathrm{grad}\, v] = \text{м}/(\text{с}\cdot\text{м}) = \text{с}^{-1},$$

размерность градиента температуры

$$[\mathrm{grad}\, T] = \text{К}\cdot\text{м}^{-1}.$$

Известно, что средний градиент температуры земной коры (геотермический градиент) направлен к центру Земли и составляет около 0,03 К/м. Это означает, что температура земной коры возрастает в среднем на 3°С на каждые 100 м глубины.

▲ КРИВИЗНА И РАДИУС КРИВИЗНЫ

На различных участках кривой линии ее кривизна может быть различной. Для оценки кривизны линий введены понятия *кривизны и радиуса кривизны.*

Малые участки Δs_1 и Δs_2 кривой линии ab всегда можно совместить с некоторой окружностью (рис. 6). Радиусы R_1 и R_2 этих окружностей называются *радиусами кривизны кривой* линии на данных участках. Если вообще участок кривой бесконечно мал ($\Delta s \to 0$), то можно говорить о радиусе кривизны R кривой в данной точке.

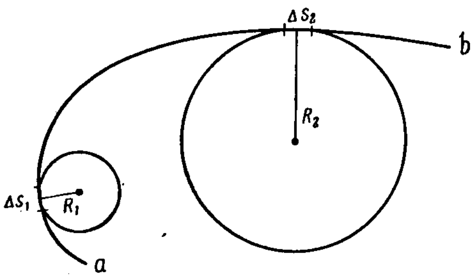


Рис. 6

Величина, обратная радиусу кривизны, называется *кривизной кривой линии*: $K = 1/R$. Отметим, что у прямой линии $R = \infty$, а $K = 0$.

▲ ПРОИЗВОДНАЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЛ

Производной функции $y = f(x)$ называется предел отношения приращения Δy функции к приращению Δx аргумента, когда последнее стремится к нулю. Обозначают производную символами y', или $f'(x)$, или $\mathrm{d}y/\mathrm{d}x$ (читается: «де игрек по де икс»). Таким образом,

$$y' = f'(x) = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}, \qquad (1)$$

где $\mathrm{d}y$ — главная часть приращения функции y при бесконечно малом приращении $\mathrm{d}x$ аргумента x. Символы $\mathrm{d}y$ и $\mathrm{d}x$ называются соответственно *дифференциалом функции* и *дифференциалом аргумента*. Из (1) следует, что

$$\mathrm{d}y = f'(x)\,\mathrm{d}x, \tag{2}$$

т. е. дифференциал функции равен произведению ее производной на дифференциал аргумента.

Процесс вычисления (взятия) производной называется *дифференцированием*. Правила дифференцирования и формулы производных различных функций выводятся в курсе высшей математики. Приведем только те формулы и правила дифференцирования, которые применяются в данном учебнике (C и n — постоянные величины, e — основание натуральных логарифмов):

$$(C)' = 0, \qquad [C \cdot f(x)]' = C \cdot f'(x);$$

$$(x^n)' = nx^{n-1}, \qquad [f_1(x) \pm f_2(x)]' = f_1'(x) \pm f_2'(x);$$

$$(\mathrm{e}^x)' = \mathrm{e}^x, \qquad [f_1(x) \cdot f_2(x)]' = f_1'(x) \cdot f_2(x) + f_1(x) \cdot f_2'(x);$$

$$(\ln x)' = \frac{1}{x}, \qquad \left[\frac{f_1(x)}{f_2(x)}\right]' = \frac{f_1'(x) \cdot f_2(x) - f_1(x) \cdot f_2'(x)}{f_2^2(x)};$$

$$(\sin x)' = \cos x,$$

$$(\cos x)' = -\sin x, \qquad \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}u}\,\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}x} = f'(u) \cdot \varphi'(x),$$

$$(\operatorname{ctg} x)' = -\frac{1}{\sin^2 x}, \qquad \text{если } y = f(u), \text{ где } u = \varphi(x).$$

Вычислим, например, производную функции

$$y = Ax^3\mathrm{e}^{-kx^2},$$

где A и k — постоянные:

$$y' = A\left(x^3\mathrm{e}^{-kx^2}\right)' = A\left[(x^3)'\,\mathrm{e}^{-kx^2} + x^3\left(\mathrm{e}^{-kx^2}\right)'\right] =$$

$$= A\left[3x^2\mathrm{e}^{-kx^2} + x^3\mathrm{e}^{-kx^2}(-2kx)\right] = Ax^2\mathrm{e}^{-kx^2}(3 - 2kx^2).$$

▲ ИНТЕГРИРОВАНИЕ И ИНТЕГРАЛ

Интегрирование является действием, обратным дифференцированию. Знак $\int$ этого действия называется *интегралом*. Таким образом, если дифференциал функции $F(x)$ есть $f(x)\mathrm{d}x$, то интеграл выражения $f(x)\mathrm{d}x$ будет равен $F(x) + C$, где C — некоторая (любая) постоянная величина:

$$\int f(x)\,\mathrm{d}x = F(x) + C, \tag{3}$$

где $f(x)\mathrm{d}x$ — *подынтегральное выражение*, $f(x)$ — *подынтегральная функция*, x — *переменная интегрирования*, $F(x)$ — *первообразная функции*, C — *постоянная интегрирования*.

Действительно, взяв дифференциал от обеих частей равенства (3), получим

$$\mathrm{d}\int f(x)\,\mathrm{d}x = f(x)\,\mathrm{d}x = \mathrm{d}F(x).$$

Поскольку C может иметь *любые* значения, интеграл, стоящий в левой части равенства (3), тоже может иметь любые значения. В этом смысле $\int f(x)\mathrm{d}x$ называется *неопределенным интегралом*.

Пользуясь формулами и правилами дифференцирования, приведенными в предыдущем разделе этого параграфа, нетрудно получить соответствующие формулы неопределенных интегралов и правила интегрирования:

$$\int x^n\mathrm{d}x = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C, \text{ где } n \neq -1;$$

$$\int e^x\mathrm{d}x = e^x + C;$$

$$\int \frac{\mathrm{d}x}{x} = \ln x + C;$$

$$\int \cos x\mathrm{d}x = \sin x + C;$$

$$\int \sin x\mathrm{d}x = -\cos x + C;$$

$$\int \frac{\mathrm{d}x}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x + C;$$

$$\int [f_1(x) + f_2(x)]\,\mathrm{d}x = \int f_1(x)\,\mathrm{d}x + \int f_2(x)\,\mathrm{d}x;$$

$$\int Cf(x)\,\mathrm{d}x = C\int f(x)\,\mathrm{d}x;$$

$$\int u\mathrm{d}v = uv - \int v\mathrm{d}u, \text{ где } u = f_1(x), \quad v = f_2(x).$$

Эти формулы нужны для вычисления *определенного интеграла*, который используется для нахождения числового значения площади фигур, кинематических характеристик движения тел, значений работы, энергии, потенциала электрического поля, энергии магнитного поля, интенсивности света и многих других физических величин.

Так, например, площадь S криволинейной трапеции, ограниченной графиком функции $y = f(x)$, осью абсцисс и ординатами $x = a$ и $x = b$, равна разности $F(b) - F(a)$, где $F(x)$ — первообразная функция для $f(x)$. Эта разность и называется *определенным интегралом* (поскольку она, очевидно, не содержит постоянной интегрирования C), обозначаемым символом $\int\limits_a^b f(x)\,\mathrm{d}x$.

Тогда

$$\int\limits_a^b f(x)\,\mathrm{d}x = F(b) - F(a) = F(x)\Big|_a^b = S,$$

где a и b — соответственно *нижний* и *верхний пределы интегрирования.*

Итак, *определенный интеграл равен разности значений первообразной функции, взятой при верхнем и при нижнем пределах интегрирования.*

Если, например, $f(x) = 2x^2(8x + 3)$, $a = 1$ м и $b = 2$ м, то, используя соответствующие формулы интегрирования, получим

$$S = \int\limits_1^2 2x^2(8x + 3)\,\mathrm{d}x = 2\int\limits_1^2 (8x^3 + 3x^2)\,\mathrm{d}x =$$

$$= 2\int\limits_1^2 8x^3\mathrm{d}x + 2\int\limits_1^2 3x^2\mathrm{d}x = 16\,\frac{x^4}{4}\Big|_1^2 + 6\,\frac{x^3}{3}\Big|_1^2 = 4(16 - 1) +$$

$$+ 2(8 - 1) = 74\ (\text{м}^2).$$

Контрольные вопросы

1. *Сколько основных единиц физических величин имеет Международная система единиц?* 2. *Какие процессы составляют физическую форму движения материи?* 3. *Перечислите основные физические величины.* 4. *Какие единицы физических величин обозначаются* К *и* кд? 5. *Какую размерность имеет сила?* 6. *Что означает символ* $<<$? 7. *Каков порядок скорости звука, если она равна* 342 м/с? 8. *Сколько сантиметров содержится в гигаметре?** 9. *Сколько нанометров содержится в микрометре?* 10. *Сколько членов содержит* $\sum\limits_4^{19} a_i$? 11. *Чему равно отношение размерности физической величины к размерности градиента этой же физической величины?* 12. *Как направлен градиент плотности воды в море?* 13. *Температура воздуха у поверхности Земли* +16° С, *а на высоте* 10 км —44° С. *Чему равен вертикальный градиент температуры в данном слое атмосферы?* 14. *Радиус окружности* 25 см. *Чему равна кривизна этой окружности?* 15. *Вычислите производную функции* $y = \sin^2\omega t$, *где* t — *время,* ω — *постоянная величина*

---

* Для ответов на вопросы 8 и 9 следует ознакомиться с приложением IV.

Часть I

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Глава I. ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ (ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ)

§ 4. Общий случай криволинейного движения материальной точки. Основные характеристики движения

Простейшим видом движения материи является *механическое движение*, представляющее собой перемещение в пространстве тел или их частей относительно друг друга.

Различают три вида механического движения тел — *поступательное*, *вращательное* и *колебательное*. При поступательном движении твердого тела все его точки описывают совершенно одинаковые (при наложении совпадающие) линии и имеют одинаковую скорость и одинаковое ускорение (в данный момент времени). Определение вращательного движения тела дано в § 21, колебательного — в § 27.

Если форма и размеры тела не оказывают существенного влияния на характер его движения, то такое тело можно принять за материальную точку.

Материальной точкой называется тело, формой и размерами которого можно пренебречь в данной задаче.

Последняя оговорка весьма существенна: при изучении одного движения тела можно считать его материальной точкой, тогда как при рассмотрении другого движения того же самого тела это может оказаться недопустимым. Например, изучая движение Земли вокруг Солнца, можно и Землю и Солнце считать материальными точками. Изучая же движение Земли вокруг своей оси, нельзя принимать Землю за материальную точку, так как на характер вращательного движения Земли существенно влияют ее форма и размеры.

Перемещение тела можно рассматривать только относительно какого-либо другого тела или группы тел. Поэтому и при изучении движения материальной точки необходимо прежде всего выбрать *систему отсчета*, т. е. систему координат, связанную с телом, относительно которого рассматривается движение материальной точки. Такой системой отсчета может служить, например, прямоугольная система координат XYZ, связанная с какой-нибудь точкой O земной поверхности (рис. 7). Тогда положение материальной точки A в любой момент времени определится координатами x,y,z.

Линия, описываемая движущейся материальной точкой, называется траекторией.

Отрезок траектории BC, пройденный точкой за некоторый промежуток времени, представляет *путь*, пройденный точкой за этот промежуток времени, а прямолинейный отрезок BC — *перемещение* точки (рис. 7). Движение называется *прямолинейным*, если траектория — прямая линия, и *криволинейным*, если траектория — кривая линия. Очевидно, что при прямолинейном движении перемещение и путь совпадают.

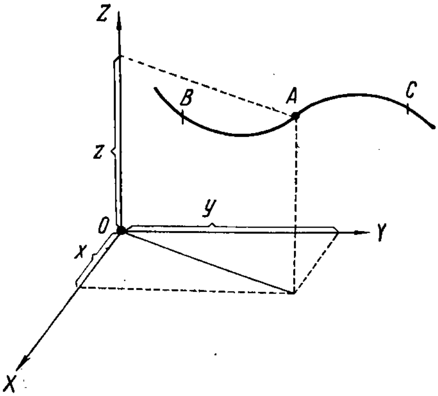


Рис. 7

Пусть материальная точка, двигаясь по криволинейной траектории, прошла за малый промежуток времени Δt малый путь Δs (рис. 8). Проведем касательную AC к траектории в точке A и хорду AB.

Отношение пути, пройденного материальной точкой, к промежутку времени, за который этот путь пройден, называется средней скоростью движения:

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \qquad (1)$$

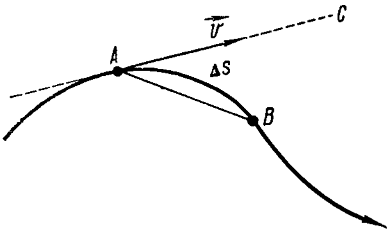


Рис. 8

Это скалярная величина. В общем случае криволинейного (и прямолинейного) движения средняя скорость может быть различной на разных участках траектории и зависеть от пути Δs, или, что то же, от промежутка времени Δt.

Следовательно, $v_{\text{ср}}$ недостаточно полно характеризует движение. Поэтому вводят понятия *мгновенной скорости* (скорости в данный момент времени в данной точке пути). Будем бесконечно уменьшать промежуток времени, т. е. положим $\Delta t \to 0$. Тогда точка B стремится к точке A, хорда AB — к дуге Δs и обе они в пределе совпадут с касательной AC. Таким образом, криволинейное движение по малой дуге Δs перейдет в прямолинейное движение по бесконечно малому отрезку касательной к траектории вблизи точки A, а средняя скорость на малом пути Δs перейдет в *мгновенную* скорость в точке A, направленную по касательной к траектории (рис. 8). Поэтому модуль

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} v_{\text{ср}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}. \qquad (2)$$

Итак,
мгновенная скорость движения в любой точке траектории есть вектор, направленный по касательной к траектории, а по модулю равный пределу средней скорости при стремлении промежутка времени к нулю.

Из формул (1) и (2) следует, что скорость выражается в *метрах в секунду*. Движение материальной точки называется *равномерным*, если его скорость не изменяется с течением времени; в противном случае движение называется *неравномерным*. Неравномерность движения характеризуется физической величиной, называемой *ускорением*.

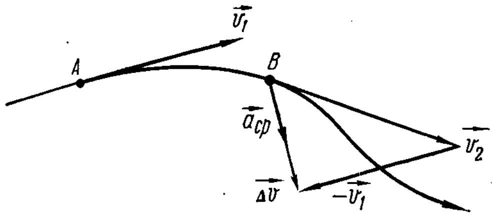


Рис. 9

Пусть материальная точка переместилась за малый промежуток времени Δt из A, где она имела скорость $\mathbf{v}_1$, в B, где она имеет скорость $\mathbf{v}_2$ (рис. 9). Изменение (приращение) скорости точки есть вектор $\Delta\mathbf{v}$, равный разности векторов конечной и начальной скоростей:

$$\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1.$$

Отношение изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло, называется средним ускорением:

$$\mathbf{a}_{\text{ср}} = \frac{\Delta\mathbf{v}}{\Delta t}. \qquad (3)$$

Из правила деления вектора на скаляр следует, что среднее ускорение направлено так же, как приращение скорости, т. е. под углом к траектории в сторону ее вогнутости (рис. 9).

В общем случае среднее ускорение может быть различным на различных участках траектории. Оно зависит от промежутка времени, по которому проводится усреднение. Будем уменьшать промежуток времени. В пределе при $\Delta t \to 0$ точка B будет стремиться к точке A и среднее ускорение на пути AB превратится в *мгновенное ускорение* $\mathbf{a}$ в точке A. Поэтому

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \mathbf{a}_{\text{ср}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}. \qquad (4)$$

Итак,
мгновенное ускорение движения в любой точке траектории есть вектор, направленный под углом к траектории в сторону ее вогнутости, а по модулю равный пределу среднего ускорения при стремлении промежутка времени к нулю.

Из формул (3) и (4) следует, что ускорение выражается в *метрах на секунду в квадрате* (м/с²).

Вектор ускорения принято раскладывать на две составляющие, одна из которых направлена по касательной к траектории и называется *касательным или тангенциальным ускорением* $\mathbf{a}_к$, другая — по нормали к траектории и называется *нормальным или центростремительным** ускорением $\mathbf{a}_{цс}$ (рис. 10). Ускорение и его составляющие связаны между собой очевидными соотношениями:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_к + \mathbf{a}_{цс}; \quad a = \sqrt{a_к^2 + a_{цс}^2}.$$

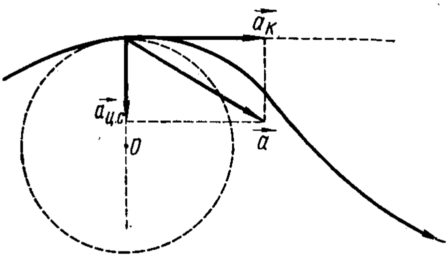


Рис. 10

Касательное ускорение изменяет только значение скорости, а центростремительное ускорение — только ее направление. Очевидно, что криволинейное движение происходит всегда с ускорением, так как в этом случае скорость обязательно изменяется (по крайней мере по направлению).

Мы ознакомились с общим случаем неравномерного движения материальной точки по криволинейной траектории произвольной формы. В последующих параграфах рассмотрим частные случаи: прямолинейное движение и движение по окружности.

§ 5. Прямолинейное движение материальной точки

При прямолинейном движении центростремительная составляющая ускорения отсутствует ($\mathbf{a}_{цс} = 0$), поэтому полное ускорение совпадает со своей касательной составляющей ($\mathbf{a} = \mathbf{a}_к$).

Движение, происходящее с постоянным ускорением ($\mathbf{a} = \mathrm{const}$), *называется равнопеременным* (*равноускоренным, если* $a > 0$, *и равнозамедленным, если* $a < 0$).

В этом случае мгновенное ускорение равно среднему ускорению за *любой* промежуток времени. Тогда из формулы (3) получим

$$a = a_{ср} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{t},$$

откуда

$$v = v_0 + at, \tag{5}$$

где v_0 — начальная скорость движения, v — скорость в момент времени t.

---

* Будучи перпендикулярным касательной, вектор $\mathbf{a}_{цс}$ направлен по радиусу кривизны траектории к центру кривизны O (рис. 10), отсюда название — *центростремительное* ускорение.

Средняя скорость на *любом отрезке* пути s в этом случае равна $(v_0 + v)/2$. Тогда, учитывая формулу (1), можно написать, что

$$v_{ср} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s}{t} = \frac{v_0 + v}{2},$$

откуда

$$s = \frac{v_0 + v}{2} t.$$

Подставляя выражение v из формулы (5), получим

$$s = \frac{v_0 + v_0 + at}{2} t,$$

или

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \qquad (6)$$

Формулы (5) и (6) можно вывести из выражений мгновенного ускорения и мгновенной скорости посредством интегрирования.

Согласно (2), $dv = a dt$. Тогда $\int\limits_{v_0}^{v} dv = a \int\limits_{0}^{t} dt$, откуда $v - v_0 = at$ и $v = v_0 + at$.

Согласно (4), $ds = v dt$. Тогда

$$\int\limits_0^s ds = \int\limits_0^t v dt = \int\limits_0^t v_0 dt + \int\limits_0^t at dt, \quad \text{откуда} \quad s = v_0 t + at^2/2.$$

Решая совместно уравнения (5) и (6) и исключая из них время t, получим

$$v^2 - v_0^2 = 2as. \qquad (7)$$

Формулы (5) — (7) справедливы для любого равнопеременного прямолинейного движения, в том числе для свободного падения тела и для движения тела, брошенного вертикально вверх. В этих случаях, как известно, $a = g = 9{,}81$ м/с^2 (ускорение свободного падения).

Для *равномерного прямолинейного* движения $v = v_0 = \text{const}$ и $a = 0$. В этом случае формула (6) примет вид

$$s = vt. \qquad (8)$$

§ 6. Движение материальной точки по окружности

Рассмотрим движение материальной точки по окружности с постоянной по модулю скоростью. В этом случае, называемом *равномерным движением по окружности*, касательная составляющая ускорения отсутствует ($\mathbf{a}_к = 0$) и ускорение совпадает со своей центростремительной составляющей ($\mathbf{a} = \mathbf{a}_{цс}$). Определим центростремительное ускорение.

Пусть за малый промежуток времени Δt точка прошла путь Δs, переместившись из A, где она имела скорость $\mathbf{v}_1$, в B, где она имеет скорость $\mathbf{v}_2$, а радиус-вектор движущейся точки повернулся на малый угол $\Delta\varphi$ (рис. 11). Построим вектор изменения скорости $\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1$ и определим его модуль Δv; $\angle AOB = \angle BCD$ как углы с взаимно перпендикулярными сторонами; $v_1 = v_2 = v$, так как по числовому значению скорость постоянна. Следовательно, $\triangle AOB$ и $\triangle BCD$ подобны как равнобедренные с одинаковыми углами при вершине, поэтому

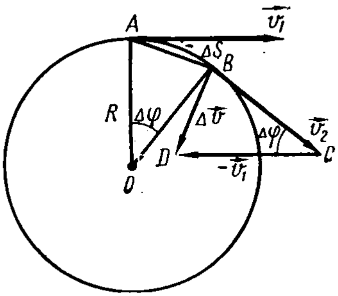


Рис. 11

$$\Delta v/v = |AB|/R \text{ и } \Delta v = v\,|AB|/R.$$

Тогда [см. (4)]

$$a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{v \cdot |AB|}{R\Delta t},$$

или, учитывая, что v и R постоянны и $a = a_{\text{цс}}$, получим

$$a_{\text{цс}} = \frac{v}{R} \lim_{\Delta t \to 0} \frac{|AB|}{\Delta t}.$$

При Δt, стремящемся к нулю, хорда AB стремится к дуге Δs, поэтому

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{|AB|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = v.$$

Следовательно,

$$a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{R}. \tag{9}$$

Рис. 11 позволяет еще раз убедиться в том, что полученное ускорение действительно является центростремительным. В самом деле, при $\Delta t \to 0$ будет и $\Delta\varphi \to 0$. При этом векторы $\Delta\mathbf{v}$ и $\mathbf{a}$, имеющие одинаковое направление (см. § 4), совпадут с радиусом окружности и будут направлены к ее центру O.

Наряду со скоростью v равномерное движение материальной точки по окружности можно характеризовать угловой скоростью ω. *Угловой скоростью называется отношение угла поворота радиуса R (т. е. отношение углового пути) к промежутку времени, за который этот поворот произошел:*

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}{}^{*}. \tag{10}$$

---

* Для неравномерного движения вводится понятие *мгновенной угловой скорости*

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