

В.А. Яковенко Г.А. Заборовский
С.В. Яковенко

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Механика



В.А. Яковенко Г.А. Заборовский
С.В. Яковенко

ОБЩАЯ ФИЗИКА Механика

Утверждено
Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебника
для студентов учреждений высшего образования
по педагогическим специальностям
физико-математического профиля

Под общей редакцией
В.А. Яковенко



Минск
«Вышэйшая школа»
2015

УДК 531/534(075.8)

ББК 22.2я73

Я 47

Рецензенты: кафедра теоретической физики УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»; доцент кафедры физики УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» кандидат физико-математических наук *А.В. Березин*

В оформлении переплета использована фотография маятника Фуко, установленного в Белорусском государственном педагогическом университете имени Максима Танка.

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

Яковенко, В. А.

Я 47 Общая физика. Механика : учебник / В. А. Яковенко, Г. А. Заборовский, С. В. Яковенко ; под. общ. ред. В. А. Яковенко. — Минск : Вышэйшая школа, 2015. — 383 с. : ил.

ISBN 978-985-06-2641-7.

Учебник создан на базе лекций, в течение ряда лет читаемых в Белорусском государственном педагогическом университете имени Максима Танка. Особое внимание уделено выяснению физического смысла и содержания основных понятий и законов механики, развитию у студентов физического мышления, формированию умения ставить и решать конкретные задачи.

Для студентов учреждений высшего образования по педагогическим специальностям физико-математического профиля. Будет полезен преподавателям средних специальных и общеобразовательных учреждений.

УДК 531/534(075.8)

ББК 22.2я73

ISBN 978-985-06-2641-7

© Яковенко В.А., Заборовский Г.А.,
Яковенко С.В., 2015

© Оформление. УП «Издательство
“Вышэйшая школа”», 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Необходимость издания данного учебника обусловлена следующими обстоятельствами. В 2013 г. принят новый Образовательный Стандарт Республики Беларусь по специальностям 1-02 05 02 «Физика и информатика» и 1-02 05 04 «Физика и техническое творчество» с четырехлетним сроком обучения (вместо существовавшего ранее пятилетнего). В соответствии с этим произошли определенные изменения в программе курса «Общая физика». Особенно существенно сокращена программа по теоретической физике.

В итоге для достижения необходимого, хотя в значительной степени все же не совсем оптимального уровня знаний по физике будущего преподавателя, что вызвано дефицитом учебного времени, единственный путь — это развитие форм и совершенствование управляемой самостоятельной работы студентов (УСРС). Отметим, что эффективность такой формы учебной деятельности возможна лишь при определенных организационных и методических предпосылках.

Вследствие сказанного выше при организации учебного процесса, а также в структуре курса «Механика» серьезное внимание должно уделяться вопросам УСРС. Для реализации этой задачи в качестве приложения к учебнику разработан компьютерный вариант контроля знаний студентов, который состоит из девяти коллоквиумов, включающих все темы программы курса.

Как известно, основные особенности учебного процесса при обучении педагогическим специальностям — обеспечение осмысленного овладения студентами основами наук, развитие у них творческих познавательных способностей, установление прочных связей обучения с практическими потребностями учебного процесса современной общеобразовательной школы.

Вместе с тем следует констатировать, что в последнее время резко падает интерес учащихся средней общеобразовательной школы к изучению физики и математики. Это обстоятельство подтверждает анализ школьной подготовки по данным предметам студентов физико-математических и технических специальностей учреждений высшего образования Республики Беларусь, а также результатов централизованного тестирования. Так, серьезную тревогу вызывает тот факт, что примерно

40% выпускников общеобразовательных школ в 2014 г. не смогли преодолеть по этим предметам установленный минимальный уровень, который составлял всего 15 баллов из 100. Кроме того, отметим, что по дополнительному набору поступили абитуриенты с еще более низким баллом.

В процессе изучения общей физики у студентов – будущих преподавателей – должно сформироваться представление о физике как о науке, имеющей экспериментальную основу, так и о фундаментальной науке, цель которой состоит в формулировке общих законов природы, объяснении конкретных явлений на основе этих законов, предсказании новых явлений. Они должны ознакомиться с историей важнейших физических открытий, с историей возникновения, становления теорий, идей и понятий, узнать о вкладе выдающихся отечественных и зарубежных ученых в развитие физики. Очень важно привить студентам умение самостоятельно пополнять свои знания, ориентироваться в стремительном потоке научной информации.

В связи с этим исключительно большое значение для будущего преподавателя физики имеет формирование навыков самостоятельного овладения знаниями и их практического применения, поэтому многие вопросы курса предлагаются для самостоятельного изучения с использованием созданного на физико-математическом факультете Белорусского государственного педагогического университета имени Максима Танка учебно-методического комплекса «Общая физика». При этом не ставится цели охватить все стороны предмета или заменить другие формы работы. Подбор заданий направлен на формирование базовых умений и навыков путем их применения в разных ситуациях, а также на развитие активности и самостоятельности студентов.

Материал учебника распределен между авторами следующим образом: введение, § 2.7–2.9, гл. 5, 7–9, список рекомендуемой литературы написал профессор В.А. Яковенко; гл. 1, § 2.1–2.6, гл. 3, 6 – доцент Г.А. Заборовский, гл. 4, 10, 11 и предметный указатель – доцент С.В. Яковенко.

Авторы выражают искреннюю благодарность коллективу кафедры теоретической физики Гродненского государственного университета имени Янки Купалы (заведующий кафедрой кандидат технических наук, доцент А.В. Никитин) и доценту кафедры физики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники кандидату

физико-математических наук А.В. Березину, взявшим на себя труд по рецензированию рукописи. Их замечания учтены при окончательной доработке рукописи и во многом способствовали улучшению ее качества. Авторы признательны также О.А. Бордович, оказавшей большую помощь в графическом оформлении и общей подготовке рукописи.

Свой труд авторы посвящают сорокалетию (1974–2014 гг.) физического факультета Белорусского государственного педагогического университета имени Максима Танка.

Все отзывы, критические замечания и пожелания просьба направлять по адресу: издательство «Вышэйшая школа», пр. Победителей, 11, 220048, Минск.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Предметом физики является изучение самых простых и вместе с тем наиболее общих закономерностей природы, строения и свойств материи, законов взаимодействия и движения материальных тел. Науки, которые изучают разные виды движения материи, составляют систему естествознания. Физика является в значительной степени фундаментом всех естественных наук. Так, она объясняет природу периодичности свойств химических элементов и механизм возникновения межатомных и межмолекулярных сил. В основе всей современной электроники лежат физические закономерности взаимодействия электрических зарядов и электромагнитных полей.

Слово «физика» (*tà physiká*, от *phýsis* — природа) в переводе с греческого языка означает «наука о природе». Первоначально эта наука была единой. По мере накопления сведений об окружающем мире и их научного обобщения из общей науки о природе выделились отдельные науки, в том числе и физика.

Весь опыт естествознания и современной науки доказывает, что мир материален. Что это означает? Материя и движение — основные понятия естествознания. Под *материей* понимают объективную реальность, которая существует независимо от человеческого сознания и отражается им. Известны два вида материи: *вещество* и *поле*. К первому виду принадлежат атомы, молекулы и все состоящие из них тела. Второй вид материи образуют электромагнитное, гравитационное и другие поля. Разные виды материи могут превращаться друг в друга, например электрон и позитрон (которые представляют собой вещество) — в фотоны (т.е. в электромагнитное поле). Возможен и обратный процесс.

Материя вечно и непрерывно развивается, при этом она находится в постоянном движении. Под *движением* в широком смысле слова понимают все изменения материи — от простого перемещения до сложнейших процессов мышления. Некоторые изменения происходят очень медленно, поэтому становятся заметными через большой интервал времени. Так изменяется мир галактик, звезд. Время, за которое на Земле меняются очертания гор, материков и океанов, несравнимо с продолжительностью человеческой жизни. Другие изменения происходят значительно быстрее, их можно обнаружить,

если проследить за предметом на протяжении относительно небольшого промежутка времени. Например, вода с течением времени испаряется, а при охлаждении превращается в лед, брошенный камень падает на землю и т.д. С некоторыми объектами природы изменения происходят настолько быстро, что проследить за ними человек может только с помощью специальных приборов.

Материя и движение неразделимы. Конкретным формам материи свойственны конкретные формы их движения, и наоборот. Например, механическому движению соответствуют небесные и земные тела конечных размеров, проявлению жизни — биополимеры (белки, нуклеиновые кислоты и др.) и т.д.

Все изменения в окружающем нас мире происходят в определенной последовательности, имеют большую или меньшую продолжительность. Бесперывное и бесконечное развитие материи проявляется во времени. Время — форма существования материи.

Все материальные тела обладают пространственной протяженностью, некоторым образом расположены относительно друг друга. Два тела не могут одновременно находиться в одном и том же месте. Пространство и время нельзя отделить от материи, потому что они являются взаимосвязанными формами ее существования. Эта взаимосвязь проявляется, в частности, в механическом движении, когда тела перемещаются относительно друг друга в пространстве с течением времени.

Физика — экспериментальная наука. Процесс познания в физике начинается или с наблюдения явлений в естественных условиях, или со специально поставленных опытов — экспериментов. В результате обобщения опытных данных появляется научное суждение о механизме явления в виде гипотезы. Если гипотеза при ее логическом развитии приводит к выводам, которые подтверждаются опытами, то она входит в науку в качестве физической теории. Правильная физическая теория дает качественные и количественные объяснения явлений природы и формулирует их законы.

Физические законы обычно выражаются в виде количественных зависимостей между физическими величинами. Математический аппарат, который использует физика, позволяет не только количественно выражать найденные зависимости, но и исследовать их и находить новые. Физические законы дают возможность предсказывать ход событий в определенных условиях. Проверка этих предсказаний помогает

установить область применения того или иного закона и оценить точность предсказаний, а также точность измерений.

Физика настолько тесно связана с математикой, что многие новые идеи и методы в математике часто возникали под влиянием физики. С одной стороны, создание теории электромагнитного поля привело к развитию векторного анализа, с другой — развитие таких разделов математики, как тензорное исчисление, риманова геометрия, теория групп и других, стимулировалось новыми физическими теориями — общей теорией относительности и квантовой механикой.

Органическая связь физики с другими отраслями естествознания привела к образованию ряда пограничных дисциплин: астрофизики, геофизики, физической химии и др. Задачи физики более широкие и общие, чем других естественных наук, которые изучают отдельные, специфические явления природы. Это объясняется тем, что физика изучает строение неживой материи и наиболее общие формы ее движения.

Развитие физики обусловлено процессом развития человеческого общества, производительных сил, потребностями практики. Физика тесно связана с техникой. Важные физические открытия приводят к техническим переворотам, созданию новых отраслей, технических направлений и развитию соответствующих технических наук. Невозможно найти такую отрасль техники, которая не выросла бы из физики.

Благодаря сознательному использованию физических законов техника в наше время вышла на широкую дорогу целенаправленного развития. Если в XIX в. между физическим открытием и его первым техническим применением проходили десятки лет, то теперь этот срок сократился до нескольких лет. Так, телефон прошел путь от идеи до первого образца за 56 лет, радио — за 35, радару потребовалось всего 15, телевизору — 14, транзисторам — 5, лазерам — только 3 года. Ярким подтверждением сказанного является та стремительность, с которой ворвалась в нашу повседневную жизнь микроэлектроника.

В свою очередь развитие техники дает физике новые, более современные, более точные приборы и методы исследования, которые позволяют проникать в глубь вещества. Это и электронная аппаратура, и вычислительные машины, и ускорители элементарных частиц, и приборы для изучения недр Земли, подводного мира, космического пространства. Физика и техника питают друг друга своими идеями и содействуют развитию как теории, так и практики.

Один из основателей новой физики XX в. немецкий физик-теоретик Макс Борн (1882–1970) много занимался анализом вклада физики в теорию познания, стремился философски осмыслить новый этап развития физической науки. Он отмечал: «Истинная наука философична, и физика, в частности, — это не только первый шаг к технике, но и путь к глубочайшим пластам человеческой мысли».

В соответствии с разнообразием объектов исследования и форм движения материи в физике выделяют ряд разделов. Деление это неоднозначное, поскольку при этом руководствуются разными критериями, например по изучаемым объектам, по формам движения материи и т.д.

По формам движения материи физика обычно подразделяется на ряд основных разделов, которые изучают:

- *механика* — перемещение тел или их частей относительно друг друга в пространстве с течением времени;
- *молекулярная физика и термодинамика* — хаотическое движение большого количества атомов и молекул и их тепловые свойства;
- *электродинамика* — взаимодействие электрических и магнитных полей с электрическими зарядами;
- *оптика* — возникновение, особенности распространения излучения и его взаимодействие с веществом;
- *физика атомов и атомного ядра* — особенности внутриатомного и внутриядерного движения материи.

Следует отметить условный характер такого деления, поскольку в действительности, как правило, не существует резких границ между отдельными разделами физики.

1. КИНЕМАТИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

1.1. Механическое движение.

Перемещение. Траектория

Механика изучает простейшую форму движения материи — *механическое движение*.

Механика включает три основных раздела: кинематику, динамику и статику.

Кинематикой называется раздел механики, в котором изучается движение тел без учета их взаимодействий, т.е. без выяснения причин, изменяющих состояние движения. В *динамике* изучаются законы движения тел в связи с причинами, которые обуславливают тот или иной характер движения. В *статике* рассматриваются условия равновесия тел. Поскольку равновесие есть частный случай движения, законы статики оказываются естественным следствием законов динамики.

Механическим движением называется изменение положения тел или частей одного и того же тела в пространстве относительно друг друга с течением времени.

Движение происходит как в пространстве, так и во времени. Пространство и время — неотъемлемые формы существования материи. *Пространство* выражает порядок расположения тел, *время* — порядок протекания процессов и явлений. Пространство и время являются фундаментальными понятиями физики. В классической физике приняты представления об абсолютных пространстве и времени. Согласно И. Ньютону абсолютные пространство и время являются самостоятельными сущностями, не зависящими ни друг от друга, ни от находящихся в них тел и протекающих процессов. Свойства пространства и времени делят на *метрические* (протяженность, длительность) и *топологические* (размерность, непрерывность, порядок и направление). В классической физике свойства пространства описываются евклидовой геометрией.

Положение исследуемого тела может быть определено только по отношению к какому-либо другому телу. Тело, которое служит для определения положения других тел, называется *телом отсчета*. Чтобы описать движение, с этим телом связывают некоторую *систему координат* для отсчета положения в пространстве, а также *часы* для отсчета времени. Совокупность тела отсчета, связанной с ним системы координат

и часов образует *систему отсчета*. Понятие системы отсчета является одним из основополагающих в физике.

Поскольку изменение положения любого тела можно наблюдать только по отношению к другим телам, то любое движение *относительно* (как и покой). Движение одного и того же тела в разных системах отсчета может иметь различный характер. По причине относительности все системы отсчета при кинематическом рассмотрении движения равноправны. Другое дело, что в некоторых из них законы механики (об этом мы узнаем позже) принимают наиболее простой вид, и для решения конкретных задач такие системы являются более предпочтительными.

Важное место в физике занимает понятие материальной точки, потому что всякое реальное тело можно представить в виде совокупности материальных точек. *Материальной точкой* называют тело, формой, размерами и внутренней структурой которого в условиях данной задачи можно пренебречь. Такая абстракция оправдана во многих задачах, где нет необходимости учитывать форму и размеры тела, а также относительное движение отдельных его частей. Ответ на вопрос о том, можно ли считать материальной точкой данное тело, зависит не только от его размеров, но прежде всего от условия задачи. Одно и то же тело в одном случае может быть принято за материальную точку, а в другом — должно рассматриваться как протяженное.

Так, в задаче по определению времени свободного падения шара при отсутствии сопротивления воздуха неважно, вращается шар или нет. Тот же шар нельзя считать материальной точкой при определении времени его скатывания с наклонной плоскости. Очень часто материальной точкой может считаться тело, размеры которого намного меньше расстояния от него до других тел (например, Земля при определении периода ее обращения вокруг Солнца, ибо ее абсолютные размеры при этом роли не играют).

Для описания движения материальной точки нужно знать ее положение в разные моменты времени. Возможны три способа описания: 1) *координатный (скалярный)*; 2) *векторный*; 3) так называемый *естественный* (по траектории). Рассмотрим эти способы и связь между ними.

Выберем начало отсчета O и прямоугольную систему координат X, Y, Z (рис. 1.1, a). При первом способе положение точки A в любой момент времени t задается ее координатами $x,$

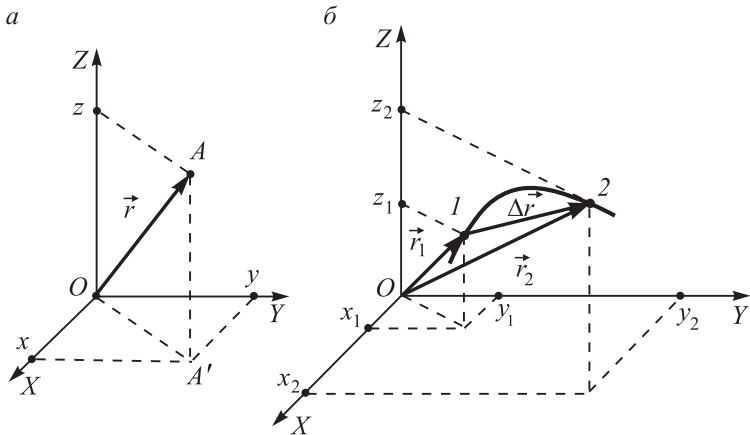


Рис. 1.1

y, z . При втором способе положение точки определяется *радиусом-вектором* \vec{r} , проведенным из начала отсчета O в данную точку A . Пусть при движении точка переместилась из положения 1 в положение 2 (рис. 1.1, б). Эти положения определяются соответствующими радиусами-векторами \vec{r}_1 и \vec{r}_2 (или координатами x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2). *Вектор, проведенный из начального положения материальной точки в положение, где точка находится в рассматриваемый момент времени, называется вектором перемещения* и обозначается $\Delta\vec{r}$. Иначе говоря, вектор перемещения \vec{r} соединяет две точки, соответствующие двум определенным положениям материальной точки при движении. Как видно из рисунка, он равен приращению радиуса-вектора за время Δt :

$$\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1.$$

Если материальная точка последовательно перемещается из положения 1 в положение 2 , а затем в положение 3 , то суммарный вектор перемещения $\Delta\vec{r}_{13}$ будет равен сумме векторов $\Delta\vec{r}_{12}$ и $\Delta\vec{r}_{23}$ (рис. 1.2):

$$\Delta\vec{r}_{13} = \Delta\vec{r}_{12} + \Delta\vec{r}_{23}.$$

Попасть из точки 1 в точку 3 можно разными путями, но суммарное перемещение во всех случаях будет одно и то же: $\Delta\vec{r}_{13}$.

Вектор перемещения показывает, в каком направлении и на какое расстояние переместилась точка относительно первоначального положения, однако ничего не говорит о том, как она

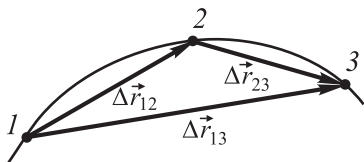


Рис. 1.2

двигалась в каждый момент времени. Например, если точка, движущаяся по окружности, вернулась в исходное положение, то перемещение численно равно нулю, хотя пройдено определенное расстояние. Таким образом, важно знать не только перемещение, но и линию, по которой происходит движение.

Линия, вдоль которой материальная точка движется в пространстве в данной системе отсчета, называется траекторией движения. Эту линию описывает конец радиуса-вектора точки.

Путь s представляет собой длину участка траектории, пройденного точкой за некоторый промежуток времени.

В зависимости от формы траектории различают прямолинейное и криволинейное движение материальной точки. При *прямолинейном* движении в одном направлении путь s равен модулю вектора перемещения $|\Delta\vec{r}|$, а при *криволинейном* движении $s > |\Delta\vec{r}|$. Например, если точка, движущаяся по окружности радиусом R , сделала половину оборота, то модуль перемещения $|\Delta\vec{r}| = 2R$, а пройденный путь $s = \pi R$ (рис. 1.3).

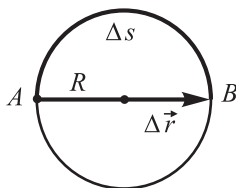


Рис. 1.3

В тех случаях, когда траектория известна, движение можно описать третьим способом (естественным), в соответствии с которым положение точки определяется длиной пути $s(t)$, пройденного по траектории за некоторый промежуток времени.

Таким образом, для описания движения необходимо задать зависимости $\vec{r}(t)$, или $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, или $s(t)$, которые называются *кинематическими законами движения*.

Вектор в пространстве в сферических координатах задается модулем $r = |\vec{r}|$ (длиной отрезка OA) и направлением (углами φ и θ) (рис. 1.4).

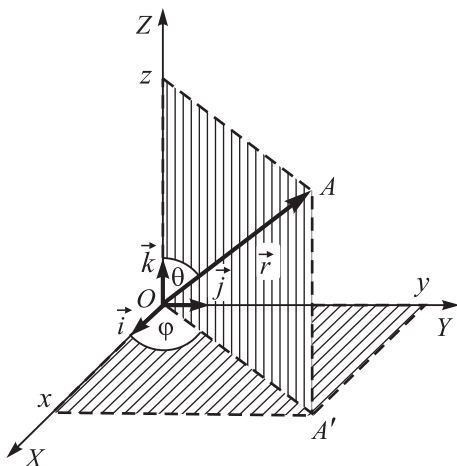


Рис. 1.4

Зная координаты x, y, z точки и соответственно единичные векторы $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$, можно определить характеристики r, φ и θ радиуса-вектора:

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

$$\cos\theta = z/r, \quad \operatorname{tg}\varphi = y/x.$$

С другой стороны, по параметрам вектора можно определить координаты:

$$x = r \sin\theta \cos\varphi, \quad y = r \sin\theta \sin\varphi, \quad z = r \cos\theta.$$

Векторный и координатный методы описания движения материальной точки по сути тождественны. Например, в декартовой системе координат радиус-вектор точки $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$,

т.е. связывает воедино три скалярных закона движения. Векторный метод предпочтителен при теоретическом исследовании характера движения. Координатный способ более удобен для решения конкретных задач.

Уравнение траектории связывает координаты движущейся

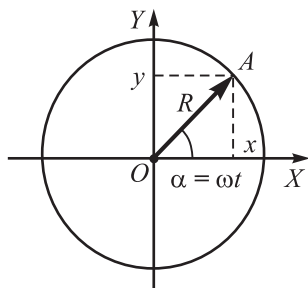


Рис. 1.5

точки, например при движении на плоскости $y = f(x)$ или $x = f(y)$. Чтобы получить уравнение траектории, необходимо из уравнений $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ исключить время. Пусть, например, движение задано уравнениями (рис. 1.5):

$$x = R \cos \omega t, \quad y = R \sin \omega t.$$

Исключив из них время, получим уравнение окружности:

$$x^2 + y^2 = R^2.$$

1.2. Скорость

Обычно при рассмотрении различных задач необходимо знать не только перемещение или пройденное расстояние, но и скорость движения (перемещения).

Различают среднюю скорость движения точки за некоторый конечный промежуток времени Δt и мгновенную скорость в данный момент времени (в данной точке траектории).

Средней скоростью движения за время Δt называют отношение вектора перемещения точки $\Delta \vec{r}$ к интервалу времени, за который произошло это перемещение:

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.1)$$

Вектор средней скорости $\langle \vec{v} \rangle$ направлен вдоль вектора перемещения $\Delta \vec{r}$, т.е. вдоль хорды AB (рис. 1.6, *a*).

Средняя скорость характеризует движение на некотором отрезке пути в целом. Для того чтобы найти скорость

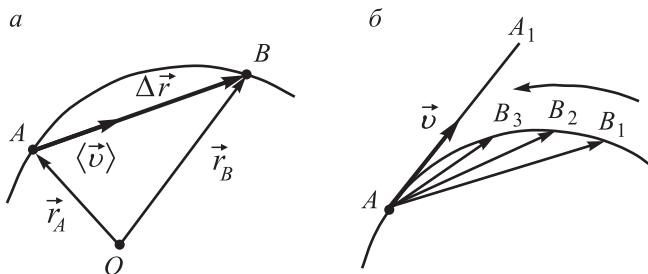


Рис. 1.6

движения в данной точке траектории, вводят понятие *мгновенной скорости*.

Будем уменьшать интервал времени Δt , при этом будет уменьшаться и соответствующий модуль перемещения $|\Delta \vec{r}|$. Точка B станет приближаться к точке A , вектор же $\Delta \vec{r}$ (хорда AB) станет поворачиваться вокруг точки A и в предельном положении (вектор $d\vec{r}$) совпадет с направлением касательной к траектории AA_1 в этой точке (рис. 1.6, б).

Вектор мгновенной скорости равен пределу отношения вектора перемещения $\Delta \vec{r}$ к интервалу времени Δt , т.е. производной радиуса-вектора \vec{r} по времени, и направлен по касательной к траектории в данной точке в направлении движения точки A (как и вектор $d\vec{r}$):

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

Разложим вектор мгновенной скорости для некоторого момента времени на составляющие вдоль координатных осей (рис. 1.7, а):

$$\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k},$$

$$\text{где } \vec{v}_x = \frac{dx}{dt} \vec{i}; \quad \vec{v}_y = \frac{dy}{dt} \vec{j}; \quad \vec{v}_z = \frac{dz}{dt} \vec{k}.$$

Тогда модуль вектора скорости

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$$

Рассмотрим некоторые частные случаи.

Для прямолинейного движения в одном направлении модуль средней скорости совпадает со значением, найденным как отношение пути ко времени:

$$\langle v \rangle = \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Если систему координат выбрать таким образом, чтобы движение происходило вдоль оси X (рис. 1.7, б), то модуль перемещения и путь будут равны изменению координаты $\Delta r = \Delta s = \Delta x = x_2 - x_1$, а модуль скорости $\langle v \rangle = \Delta x / \Delta t$.

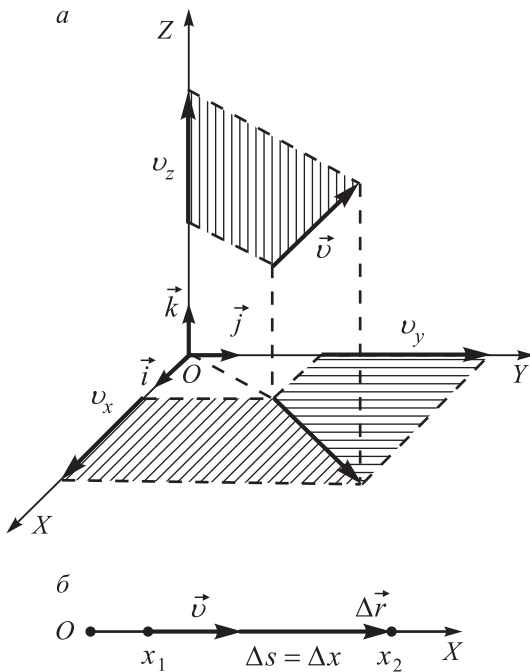


Рис. 1.7

В случае криволинейного движения

$$|\langle \vec{v} \rangle| = \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} < \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Модуль мгновенной скорости равен производной пути по времени:

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

Равномерным называется движение, при котором материальная точка за любые равные промежутки времени Δt совершает одинаковые перемещения $\Delta \vec{r}$ (проходит одинаковые пути Δs). В этом определении существенны не только равенство перемещений $\Delta \vec{r}$ (путей Δs) за равные интервалы времени Δt , но и произвольность выбора данных интервалов. Значит, какой бы интервал мы ни взяли, отношение $\Delta \vec{r} / \Delta t$ неизменно, т.е. средняя скорость при равномерном движении равна мгновенной в любой момент времени: $\langle \vec{v} \rangle = \vec{v}$.

В реальной жизни равномерное прямолинейное движение встречается не слишком часто. Чаще за одинаковые промежутки времени тело совершает неодинаковые как по величине, так и по направлению перемещения (рис. 1.8). Такое движение будет неравномерным. Для него отношения перемещения к интервалу времени непостоянные:

$$\frac{\Delta \vec{r}_{12}}{\Delta t} \neq \frac{\Delta \vec{r}_{23}}{\Delta t} \neq \frac{\Delta \vec{r}_{34}}{\Delta t}.$$

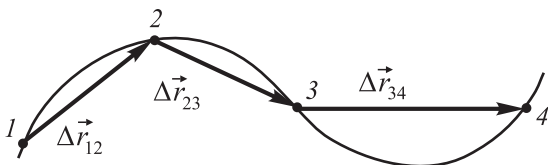


Рис. 1.8

Проиллюстрируем понятия мгновенной и средней скорости с помощью графика зависимости координаты от времени $x(t)$ (рис. 1.9).

Средняя скорость при изменении координаты на $\Delta x = x_2 - x_1$ за интервал времени $\Delta t = t_2 - t_1$ равна отношению конечных приращений, т.е. тангенсу угла наклона прямой AB :

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \text{tg } \alpha_c.$$

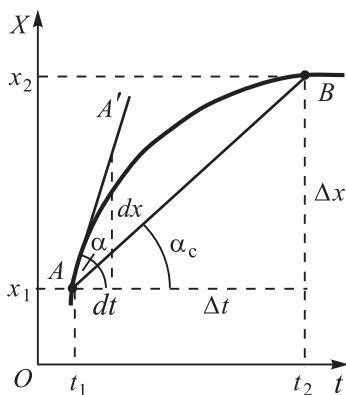


Рис. 1.9

Мгновенную скорость в момент времени t_1 получим при стремлении Δt к нулю. Она численно равна производной координаты, т.е. тангенсу угла наклона касательной AA'

$$v = \frac{dx}{dt} = \text{tg } \alpha.$$

Часто говорят, что геометрический смысл производной dx/dt — тангенс угла наклона касательной к кривой зависимости $x(t)$ в данной

точке, а физический – скорость изменения функции $x(t)$ в данной точке. В нашем примере функцией является координата, а скоростью – быстрота ее изменения.

1.3. Ускорение

Для количественной характеристики изменения скорости вводится векторная физическая величина, называемая *ускорением*. Различают среднее и мгновенное ускорения. *Среднее ускорение* равно отношению изменения вектора скорости $\Delta\vec{v}$ к интервалу времени Δt , за который произошло это изменение, и направлено вдоль вектора изменения скорости $\Delta\vec{v}$:

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

Модуль среднего ускорения в общем случае не равен отношению изменения модуля скорости ко времени. Действительно, на рис. 1.10 видно, что $\Delta v = v_2 - v_1 = ED < CD = |\Delta\vec{v}|$, поэтому

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

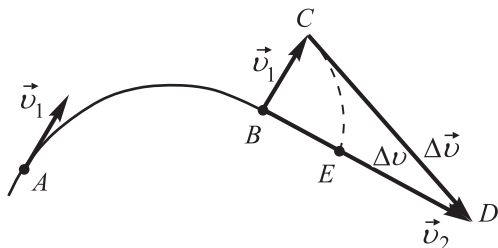


Рис. 1.10

Среднее ускорение характеризует изменение скорости за некоторый интервал времени. Для того чтобы определить изменение скорости в данный момент времени, вводят понятие *мгновенного ускорения*.

Вектор мгновенного ускорения равен пределу отношения изменения вектора скорости $\Delta\vec{v}$ к интервалу времени, который бесконечно уменьшается, т.е. производной вектора

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	6
1. Кинематика материальной точки	10
1.1. Механическое движение. Перемещение. Траектория	10
1.2. Скорость	15
1.3. Ускорение	19
1.4. Законы равномерного и равноускоренного движения	24
1.5. Движение материальной точки по окружности	32
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	<i>37</i>
2. Динамика материальной точки	39
2.1. Взаимодействие тел. Сила	39
2.2. Фундаментальные взаимодействия	41
2.3. Первый закон Ньютона. Инерция	44
2.4. Второй закон Ньютона. Масса тела	46
2.5. Импульс. Общая формулировка второго закона динамики	49
2.6. Третий закон Ньютона	53
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	<i>54</i>
2.7. Единицы измерения и размерности физических величин	56
2.8. Международная система единиц	59
2.9. Эталоны основных единиц СИ в механике	63
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	<i>65</i>
3. Динамика механических систем	67
3.1. Импульс механической системы. Центр масс	67
3.2. Уравнение движения системы. Закон сохранения импульса	70
3.3. Движение тела переменной массы	74
3.4. Движение ракет. Формула Циолковского	77
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	<i>79</i>
4. Работа и энергия	81
4.1. Работа силы. Мощность	81
4.2. Кинетическая энергия	84

4.3. Работа силы тяжести. Потенциальная энергия	87
4.4. Закон сохранения механической энергии	89
4.5. Применение законов сохранения импульса и энергии при анализе удара	92
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	<i>98</i>
5. Принцип относительности в механике	101
5.1. Инерциальные системы отсчета. Принцип относительности Галилея	101
5.2. Силы инерции при ускоренном поступательном движении системы отсчета	106
5.3. Силы инерции, действующие на тело во вращающейся системе отсчета	110
5.4. Движение тела во вращающейся системе отсчета. Сила Кориолиса	116
5.5. Влияние вращения Земли на движение тел. Маятник Фуко	122
5.6. Границы применимости классической механики	126
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	<i>131</i>
6. Механика твердого тела	135
6.1. Поступательное движение абсолютно твердого тела	135
6.2. Вращательное движение	136
6.3. Момент силы. Пара сил	139
6.4. Уравнение динамики вращательного движения тела	144
6.5. Момент импульса. Уравнение моментов	148
6.6. Закон сохранения момента импульса	151
6.7. Вычисление моментов инерции тел	153
6.8. Теорема Штейнера	156
6.9. Кинетическая энергия вращающегося твердого тела	158
6.10. Свободные оси	161
6.11. Гироскоп. Гироскопический эффект и его применение	165
6.12. Условия равновесия твердого тела. Виды равновесия	169
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	<i>171</i>
7. Силы в механике	173
7.1. Всемирное тяготение	173
7.2. Поле тяготения	177
7.3. Инертная и гравитационная масса	181
7.4. Небесная механика. Законы Кеплера	182

7.5. Движение тел в гравитационном поле. Космические скорости	185
7.6. Невесомость и перегрузки	190
7.7. Основные этапы в области освоения космоса	193
7.8. Роль белорусских космонавтов, науки и техники Республики Беларусь в освоении и исследовании космического пространства	196
7.9. Упругие силы. Закон Гука	198
7.10. Связь между деформацией и напряжением	203
7.11. Энергия упругой деформации	206
7.12. Силы трения. Внешнее и внутреннее трение	209
7.13. Трение качения	214
7.14. О природе сил трения. Роль трения в природе и технике	216
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	<i>220</i>
8. Механика жидкостей и газов	224
8.1. Механические свойства жидкостей и газов	224
8.2. Равновесие жидкости и газа. Закон Паскаля. Закон Архимеда	226
8.3. Движение идеальной жидкости. Уравнение Бернулли	232
8.4. Применение уравнения Бернулли. Закон сохранения импульса текущей жидкости	237
8.5. Движение вязкой жидкости	243
8.6. Движение тел в жидкостях и газах	247
8.7. Подъемная сила крыла самолета. Эффект Магнуса	251
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	<i>257</i>
9. Колебательное движение	260
9.1. Гармонические колебания	260
9.2. Характеристики гармонического колебательного движения	262
9.3. Колебания систем под действием упругих и квазиупругих сил	266
9.4. Энергия колебательного движения	272
9.5. Сложение колебаний одинакового направления	275
9.6. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний	280
9.7. Затухающие колебания	285
9.8. Вынужденные колебания	289
9.9. Резонанс. Добротность колебательной системы	293
9.10. Колебания в нелинейных системах	295
9.11. Колебания связанных систем	299
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	<i>303</i>

10. Волновое движение	305
10.1. Образование и распространение волн в упругой среде	305
10.2. Уравнение плоской бегущей волны	309
10.3. Скорость распространения волн	313
10.4. Фазовая и групповая скорости волн	316
10.5. Энергия волнового движения	318
10.6. Принципы Гюйгенса и Гюйгенса — Френеля. Закон отражения и преломления волн. Дифракция	322
10.7. Интерференция волн	326
10.8. Стоячие волны. Уравнение стоячей волны	329
10.9. Кинетическая и потенциальная энергия стоячей волны	331
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	334
11. Акустика	336
11.1. Волновая природа звука	336
11.2. Источники звука	338
11.3. Скорость звука	342
11.4. Распространение звука	345
11.5. Архитектурная акустика	349
11.6. Акустический резонанс. Анализ звуков	350
11.7. Характеристики звукового поля. Объективные характе- ристики звука	352
11.8. Субъективные характеристики звука	357
11.9. Отражение и поглощение звуковых волн	359
11.10. Эффект Доплера	362
11.11. Применение ультразвука	365
11.12. Инфразвук	369
<i>Вопросы и задания для самостоятельной работы</i>	371
Предметный указатель	373
Рекомендуемая литература	379

Учебное издание

Яковенко Владимир Андреевич
Заборовский Георгий Александрович
Яковенко Сергей Владимирович

ОБЩАЯ ФИЗИКА

МЕХАНИКА

Учебник

Редактор *Е.В. Малышева*
Художественный редактор *В.А. Ярошевич*
Технический редактор *Н.А. Лебедевич*
Корректор *Т.К. Хваль*
Компьютерная верстка *И.В. Войцехович, А.Г. Пархоменко*

Подписано в печать 10.11.2015. Формат 84×108/32. Бумага офсетная.

Гарнитура «NewtonС». Офсетная печать.

Усл. печ. л. 20,16. Уч.-изд. л. 21,1. Тираж 500 экз. Заказ 459.

Республиканское унитарное предприятие

«Издательство “Вышэйшая школа”».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013.

Пр. Победителей, 11, 220048, Минск.

e-mail: market@vshph.com <http://vshph.com>

Открытое акционерное общество «Полиграфкомбинат им. Я. Коласа».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/3 от 04.10.2013.

Ул. Корженевского, 20, 220024, Минск.