

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Н.А. Гладков, А.Н. Морозов, Ю.А. Струков

Механика в общем курсе физики

Учебное пособие



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО

МГТУ им. Н. Э. Баумана

2019

УДК 53(075)
ББК 22.3
Г52

Издание доступно в электронном виде по адресу
ebooks.bmstu.press/catalog/70/book1965.html

Факультет «Фундаментальные науки»
Кафедра «Физика»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Гладков, Н. А.

Г52 Механика в общем курсе физики : учебное пособие / Н. А. Гладков, А. Н. Морозов, Ю. А. Струков. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — 122, [2] с.: ил.

ISBN 978-5-7038-5028-2

В издании компактно изложены все темы первого раздела общего курса физики — механики: кинематика точки и твердого тела, динамика поступательного и вращательного движения, работа и энергия, механические колебания и волны, а также специальная теория относительности. Теоретический материал дополнен примерами с решениями.

Содержание пособия соответствует курсу лекций, читаемому авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических университетов.

УДК 53(075)
ББК 22.3

ISBN 978-5-7038-5028-2

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Предисловие

Современными образовательными стандартами предписывается повышение роли самостоятельной работы студентов. Вследствие этого при составлении учебных планов сокращают время на аудиторную работу и большее значение придают практическим занятиям студентов. В современных условиях актуальной задачей стало создание курса лекций, в котором материал, предусмотренный программой, был бы изложен в более сжатой, удобной для усвоения форме. Предлагаемое учебное пособие в определенной степени позволяет решить эту задачу. Материал пособия представлен в виде курса лекций.

Механика является первым разделом в общем курсе физики, читаемом студентам первого курса технического университета всех специальностей, обучающимся по программам бакалавриата, специалитета, магистратуры.

Цель изучения данного курса лекций — формирование глубоких знаний в области классической механики и специальной теории относительности при использовании математического аппарата дифференциального и интегрального исчисления.

Курс лекций составлен в соответствии с учебной программой МГТУ им. Н.Э. Баумана и содержит основы классической и релятивистской механики. В нем представлены основные темы механики: кинематика точки и твердого тела, динамика поступательного и вращательного движения, работа и энергия, механические колебания и волны. Значительное место отведено рассмотрению специальной теории относительности.

На практике авторам часто приходится сталкиваться с тем, что вновь вводимые понятия или физические определения трудны для понимания студентами. В связи с этим авторы уделили особое внимание логически точному определению физических понятий и формулированию физических законов и принципов.

Курс лекций написан информативно, простым лаконичным языком, не содержит усложненных доказательств и объяснений. В пособии приведены систематизированное изложение основных физических закономерностей и выводы важнейших формул. Некоторые теоретические зависимости получены авторами с использованием нового, более простого методического подхода к доказательству. Для лучшего понимания отдельных теоретических положений приведены примеры с решениями.

Авторы считают, что методика изложения материала наиболее приемлема с точки зрения понимания и усвоения изучаемого курса, а разбиение его на главы и параграфы позволяет лучше ориентироваться в изучаемом материале. Трудные для усвоения положения курса предлагается отметить каким-либо способом и вернуться к их изучению после разбора этого мате-

риала на практическом занятии или после проведения лабораторной работы по соответствующей тематике.

При желании более глубоко изучить отдельные законы или физические явления студенты могут обратиться к другим источникам, указанным в списке литературы.

Данный курс лекций окажет существенную помощь студентам в их самостоятельной работе, при выполнении домашних заданий, написании рефератов, подготовке к лабораторным работам и практическим занятиям.

Предполагается, что результатом изучения данного курса лекций явятся более глубокое понимание сути физических явлений, законов динамики поступательного и вращательного движения, законов сохранения, законов механических колебаний и волновых процессов, а также глубокое понимание и освоение положений специальной теории относительности.

Все это будет способствовать успешной сдаче модуля 1 и экзамена по общему курсу физики.

Глубокое изучение представленного материала послужит базой для освоения последующих специальных дисциплин, таких как теоретическая механика, сопротивление материалов, электротехника, теория механизмов и машин и многих других.

Принятые сокращения

- ИСО — инерциальная система отсчета
- МС — механическая система
- МТ — материальная точка
- ОТО — общая теория относительности
- ПСК — прямоугольная система координат
- РД — ракетный двигатель
- СО — система отсчета
- СТО — специальная теория относительности

Введение

Основоположником физической теории считается выдающийся английский физик и математик И. Ньютон. Ньютоновская, или классическая, механика представляет собой учение о движении материи. Механика включает в себя три раздела: кинематику, статику и динамику. Кинематика изучает движение тел независимо от причин, которые вызвали это движение. В статике рассматриваются условия равновесия тел. Динамика изучает движение тел и причины, вызывающие это движение.

Ньютоновская механика представлялась настолько могущественной, что, казалось, любое физическое явление можно объяснить с помощью законов Ньютона. Но на каждой ступени развития наши познания обусловлены исторически достигнутым уровнем науки и не могут считаться окончательными, полными. Они нуждаются в дальнейшем развитии, уточнении, проверке.

Противоречивость результатов опытов побудила А. Эйнштейна пересмотреть считавшиеся со времен Ньютона очевидными представления о пространстве и времени. Это привело к созданию релятивистской механики, в частности специальной теории относительности. В рамках этой теории уравнения движения тел, скорости которых сопоставимы со скоростью света, существенно отличаются от уравнений классической механики. Однако развитие науки не перечеркнуло ньютоновскую механику, а только установило пределы, в которых справедливы ее законы и положения. Таким образом, классическая механика, рассматривающая движение тел с небольшими скоростями ($v \ll c$), является частным случаем теории относительности (релятивистской механики).

1. КИНЕМАТИКА

1.1. Кинематика точки

Кинематика — это раздел механики, в котором движение тел и сплошных сред (газа, жидкости, деформируемого тела) рассматривается без выяснения причин, вызывающих изменение этого движения. В связи с этим в кинематике не встречаются понятия силы и массы. Единицы кинематических величин определяются единицами длины L и времени t .

В зависимости от условий движения и свойств физического объекта в кинематике выделяют кинематику точки, кинематику твердого тела, кинематику сплошной среды. В этом пособии будут рассмотрены кинематика точки и кинематика твердого тела.

Тело можно рассматривать как материальную точку (МТ) — точечное тело. Но, поскольку масса МТ в кинематике не играет никакой роли, будем изучать движение точки.

Движение физических тел происходит в пространстве и во времени. В классической, или ньютоновской, механике пространство считается однородным и изотропным, а время является абсолютной категорией. Но для того чтобы изучать это движение, необходимо выбрать систему отсчета, состоящую из системы координат и часов, связанных с некоторым физическим телом (условно считаемым неподвижным), по отношению к которому будет рассматриваться изучаемое движение. После выбора системы отсчета положение движущейся точки в произвольный момент времени t можно определить с помощью радиуса-вектора:

$$\vec{r} = \vec{r}(t), \quad (1.1)$$

проведенного из начала прямоугольной системы координат (ПСК) в подвижную точку.

Зависимость (1.1) определяет *векторный способ* задания движения точки (рис. 1.1).

Выразим \vec{r} через его проекции, например на оси ПСК:

$$\vec{r}(t) = r_x(t)\vec{i} + r_y(t)\vec{j} + r_z(t)\vec{k},$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — единичные векторы (орты); $r_x(t) = x(t)$, $r_y(t) = y(t)$, $r_z(t) = z(t)$ — проекции радиуса-вектора на соответствующие оси.

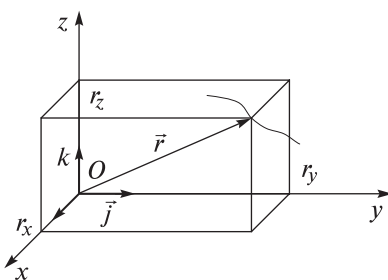


Рис. 1.1

2. ДИНАМИКА

2.1. Динамика частицы

Динамика — раздел механики, в котором движение частиц (тел) изучается совместно с причинами, определяющими это движение. Основу динамики составляют законы Ньютона, которые были сформулированы в результате обобщения многочисленных экспериментальных данных.

Первый закон Ньютона (закон инерции Галилея — Ньютона). Этот закон постулирует существование инерциальных систем отсчета (ИСО), т. е. таких систем отсчета, в которых ускорение частицы зависит только от ее взаимодействия с другими частицами. Если такого взаимодействия не происходит, то частица сохраняет состояние покоя или ее движение относительно ИСО будет прямолинейным и равномерным, т. е. движением по инерции. Всякая другая система отсчета, которая движется поступательно с постоянной скоростью ($\vec{v} = \text{const}$) по отношению к данной ИСО, также является инерциальной.

Понятие ИСО возникло в результате идеализации реального движения тел, поскольку реальные системы отсчета можно назвать инерциальными с той или иной степенью приближения. Действительно, все реальные системы отсчета сами перемещаются в пространстве с некоторым, пусть даже небольшим, но фиксированным ускорением. Например, геоцентрическая система отсчета с началом в центре Земли и осями, направленными на три звезды, не будет в точном смысле инерциальной, так как эта система отсчета движется с ускорением $a \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$, которое возникает при движении Земли вокруг Солнца. Тем не менее геоцентрическую систему отсчета с достаточной степенью точности можно считать инерциальной. В меньшей мере свойствами ИСО обладает система отсчета, жестко связанная с Землей, т. е. вращающаяся вместе с ней. Однако и в этом случае систему отсчета можно в ряде случаев считать инерциальной.

Следует отметить, что законы Ньютона справедливы лишь в инерциальных системах отсчета. Все, что было сказано о частицах, справедливо и для твердых тел.

Второй закон Ньютона (основной закон динамики). Математическое выражение этого закона имеет вид

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}, \quad (2.1)$$

где \vec{P} — импульс (количество движения) частицы, равный произведению массы m частицы и ее вектора скорости \vec{v} ,

3. РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

3.1. Работа и кинетическая энергия частицы

Пусть частица B под действием переменного вектора силы $\vec{F}(t)$ перемещается по траектории произвольной формы (рис. 3.1). В этом случае целесообразно ввести понятие элементарной работы δA , равной скалярному произведению вектора \vec{F} и вектора $d\vec{r}$ — элементарного перемещения частицы B по траектории:

$$\delta A = (\vec{F}, d\vec{r}) = F dr \cos \alpha, \quad (3.1)$$

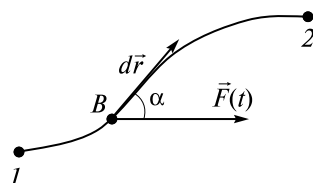


Рис. 3.1

где α — угол, образованный векторами \vec{F} и $d\vec{r}$.

Поскольку $|d\vec{r}| = ds$ (ds — элементарный путь, пройденный частицей B), вместо (3.1) используют другую форму записи элементарной работы:

$$\delta A = F ds \cos \alpha = F_s ds, \quad (3.2)$$

где F_s — проекция вектора \vec{F} на направление пути.

Общая работа, совершаемая силой \vec{F} при перемещении по всей траектории, определяется интегралом

$$A = \int_1^2 \delta A = \int_1^2 F_s ds. \quad (3.3)$$

Таким образом, работа является мерой действия силы при перемещении этой силы по определенному пути.

Если сила $\vec{F} = \text{const}$, а траектория частицы B — прямая линия, то работа, согласно формулам (3.2) и (3.3), будет определяться зависимостью

$$A = F s \cos \alpha, \quad (3.4)$$

где s — путь пройденный частицей B ; α — угол между направлениями вектора силы и вектора перемещения.

В СИ единица работы A — Дж, $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м}$.

Пусть сила $\vec{F}(t)$ действует на частицу массой m , движущуюся со скоростью $\vec{v}(t)$. В этом случае элементарную работу, определяемую форму-

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

4.1. Общие понятия

Колебания — это движения или процессы, характеризующиеся той или иной степенью повторяемости во времени.

Физические колебания характеризуются повторяемостью состояний физических систем.

Многим явлениям природы свойственны колебательные движения и процессы: пульсации звезд, колебания уровня воды в водоемах, биение сердца у людей и животных и т. д. В технике колебания могут играть как положительную роль (маятник, колебательный контур, пневмомолоток), так и отрицательную (вибрации машин и сооружений, неустойчивости при движении тел).

В дальнейшем под *колебательными системами* будем подразумевать физические системы, в которых совершаются слабозатухающие собственные колебания.

В теории колебаний достаточно детально разработаны методы построения физических и математических моделей, являющихся приемлемой идеализацией реальных колебательных систем. Анализ уравнений, которые описывают поведение этих моделей, составляет основу метода теории колебаний.

Следует отметить, что в колебаниях различной физической природы наблюдаются общие закономерности, присущие всем колебательным процессам. В связи с этим можно исследовать общие свойства колебательных процессов и описывать их одинаковыми математическими моделями. При этом выявляются различные связи между параметрами колебаний независимо от физических свойств изучаемых систем. Все это, в свою очередь, обеспечивает возможность распространения метода теорий колебаний на другие области науки, например, основные закономерности теории колебаний МС могут быть с успехом использованы в радиотехнике.

4.2. Кинематика колебаний

Представим колебания некоторой физической величины (например, смещение тела относительно положения равновесия) в виде временной функциональной зависимости $x = x(t)$. Пусть это будут *периодические колебания*, т. е. функция $x(t)$ изменяется так, что ее значение повторяется через одинаковые интервалы времени.

5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

5.1. Общие понятия

Волной называют физический процесс распространения возмущений в веществе или в поле. Возмущение, распространяющееся с помощью волнового процесса, является функцией координат $\vec{r}(x, y, z)$ и времени t . Возмущение может быть как скалярной функцией: $f = f(\vec{r}, t)$, так и векторной функцией: $\vec{f} = \vec{f}(\vec{r}, t)$.

Виды возмущений и свойства сред, в которых они распространяются, весьма разнообразны.

В зависимости от вида движения в пространстве или в телах волны подразделяют на *одномерные* (например, волны в стержнях, струнах, волноводах); *поверхностные*, возникающие на границе раздела сред (например, волны на поверхности водоема); *пространственные*, распространяющиеся в любой физической среде, занимающей определенную область пространства (например, звуковая волна в воздухе).

По направлению распространения возмущения (при этом происходит смещение частиц тела, среды) различают *продольные* и *поперечные волны*. В продольных волнах возмущение направлено вдоль движения волны. Они распространяются в любых средах: твердых, жидких, газообразных. В поперечных волнах возмущение направлено перпендикулярно направлению движения волны. Они распространяются, например, в твердых телах. К поперечным можно отнести и поверхностные волны.

Упругие волны (частный случай механических волн) — это процесс распространения возмущений в упругой среде.

Звуковые (акустические) волны — это процесс распространения в упругой среде (воздухе, воде, твердом теле) колебаний с малой амплитудой, т. е. слабых возмущений.

5.2. Упругие волны в стержне

Пусть в упругом стержне распространяется продольная волна. Направим ось x вдоль стержня. Обозначим $\xi(x, t)$ смещение частицы в момент времени t относительно положения равновесия частицы. Здесь x — координата положения равновесия частицы. При продольных колебаниях смещение происходит вдоль стержня. Выделим в стержне малый элемент его длины — dx (рис. 5.1).

6. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА

6.1. Принцип относительности в физике

Независимость законов физики от выбора инерциальных систем отсчета (ИСО), т. е. систем отсчета, которые покоятся или движутся с постоянной скоростью ($\vec{V} = \text{const}$), лежит в основе физического принципа относительности. Эта независимость подтверждена многочисленными экспериментами. В частности, никакими физическими опытами невозможно зафиксировать абсолютное движение закрытого помещения, например вагона, который скользит прямолинейно с постоянной скоростью $\vec{V} = \text{const}$, т. е. без трения, по идеально гладкой поверхности замерзшего озера. При этом экспериментатор находится внутри этого помещения. Конечно, существование таких ИСО — абстракция, однако реальные системы отсчета могут с достаточной степенью точности приближаться к такой идеализации.

Следует отметить, что физический принцип относительности видоизменялся с течением времени.

Итак, *принцип относительности* — фундаментальный физический закон, согласно которому любой физический процесс протекает одинаково в любой изолированной ИСО, находящейся в состоянии покоя, а также в любой ИСО, которая движется равномерно и прямолинейно. В этих ИСО законы физики имеют одинаковую форму.

Принцип относительности Галилея

Принцип относительности Галилея (классический принцип относительности) является основой классической физики и в современной интерпретации формулируется так:

Законы классической механики одинаковы во всех ИСО.

При этом время считается абсолютной величиной (т. е. не зависит от выбора ИСО), а окружающее пространство обладает свойствами однородности и изотропности (т. е. является евклидовым пространством). В частности, длина прямолинейного отрезка, соединяющего две произвольные точки пространства, в разных ИСО остается величиной постоянной.

Определим инвариантность законов Ньютона по отношению к разным ИСО: неподвижной ИСО- K , и подвижной ИСО- K' . При этом прямоугольная система координат (O, X, Y, Z) относится к ИСО- K , а система координат (O', X', Y', Z') — к ИСО- K' , которая движется поступательно с постоянной скоростью $\vec{V}_0 = \text{const}$ относительно ИСО- K .

Заключение

В данном учебном пособии рассмотрен первый раздел общего курса физики — механика. Знание основных законов, зависимостей, доказательств и выводов механики потребуется при изучении других разделов общего курса физики: молекулярной физики, термодинамики, электродинамики, оптики, квантовой механики, атомной физики, физики ядра и элементарных частиц.

Механика продолжает оставаться развивающейся наукой. Так, введение в научный оборот на пороге XX столетия М. Планком понятия кванта, играющего в современной физике исключительно важную роль, привело к созданию квантовой механики. Классическая механика не только помогает изучать и описывать природные явления, но и способствует созданию многих технических устройств. Законы механики используются в расчетах движения ракет, спутников, космических кораблей. Без привлечения законов классической механики, ее положений и зависимостей были бы невозможны создание мощных ракетных комплексов, современных систем вооружения, строительство уникальных мостов, зданий, различных сооружений. Законы релятивистской механики служат основой для расчета ускорителей элементарных частиц. В современном мире невозможно найти технический объект, при создании или строительстве которого не использовались бы законы механики.

Литература

1. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики: в 5 т. 5-е изд., стер. Т. 1: Механика. М.: Физматлит, 2006.
2. *Матвеев А.Н.* Механика и теория относительности: учебник для вузов. 3-е изд. М.: ОНИКС 21 век; Мир и Образование, 2003.
3. *Савельев И.В.* Курс общей физики: учебник: в 3 т. 12-е изд., стер. Т. 1: Механика. Молекулярная физика. М.: Лань, 2017.
4. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики: учеб. пособие для вузов. 4-е изд. М.: Высш. шк., 2002.
5. *Иродов И.Е.* Основные законы механики. М.: Физматлит, 2000.
6. Курс теоретической механики / под ред. К.С. Колесникова. 5-е изд., стер. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. (Механика в техническом университете).
7. Физика. Большой энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Большая Рос. энцикл., 1998.

Оглавление

Предисловие	3
Принятые сокращения	5
Введение	6
1. КИНЕМАТИКА	7
1.1. Кинематика точки	7
1.2. Кинематика твердого тела	12
Вопросы для самопроверки	15
2. ДИНАМИКА	17
2.1. Динамика частицы	17
2.2. Силы в механике	23
2.3. Динамика вращательного движения	27
Вопросы для самопроверки	39
3. РАБОТА И ЭНЕРГИЯ	41
3.1. Работа и кинетическая энергия частицы	41
3.2. Кинетическая энергия механической системы	43
3.3. Работа при вращательном движении твердого тела	45
3.4. Кинетическая энергия твердого тела при его вращательном движении	46
3.5. Кинетическая энергия твердого тела при его плоском движении	47
3.6. Мощность	48
3.7. Потенциальное поле сил	48
3.8. Закон сохранения механической энергии для частицы	55
3.9. Кинетическая и потенциальная энергии механической системы	56
Вопросы для самопроверки	57
4. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ	59
4.1. Общие понятия	59
4.2. Кинематика колебаний	59
4.3. Динамика колебаний	68
4.4. Вынужденные колебания	78
Вопросы для самопроверки	82
5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ	83
5.1. Общие понятия	83
5.2. Упругие волны в стержне	83

5.3. Характеристики волновых процессов	86
5.4. Энергия упругой волны	90
5.5. Интерференция волн	94
Вопросы для самопроверки	95
6. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА	96
6.1. Принцип относительности в физике	96
6.2. Специальная теория относительности	98
6.3. Релятивистская кинематика	100
6.4. Интервал событий	107
6.5. Релятивистская динамика	110
Вопросы для самопроверки	119
Заключение	120
Литература	121

Учебное издание

Гладков Николай Алексеевич
Морозов Андрей Николаевич
Струков Юрий Алексеевич

Механика в общем курсе физики

Редактор *И.К. Кошелева*
Художник *Э.Ш. Мурадова*
Корректор *Н.А. Фетисова*
Компьютерная верстка *Т.В. Батраковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 20.01.2019. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 10,075. Тираж 200 экз. Изд. № 375-2017. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com