

И.И. Ташлыкова-Бушкевич

Физика

Часть 1

Механика. Молекулярная
физика и термодинамика.
Электричество и магнетизм



И.И. Ташлыкова-Бушкевич

Физика

*Утверждено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебника
для студентов учреждений
высшего образования
по техническим специальностям*

В двух частях

Часть 1

Механика. Молекулярная
физика и термодинамика.
Электричество и магнетизм

2-е издание, исправленное



Минск
«Вышэйшая школа»

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

T25

Рецензенты: кафедра теоретической физики и астрономии учреждения образования «Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина» (доктор физико-математических наук, профессор *В.А. Плетюхов*); доцент кафедры физики учреждения образования «Белорусский национальный технический университет» кандидат физико-математических наук *Н.П. Юркевич*

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

Ташлыкова-Бушкевич, И. И.

T25 Физика : учебник. В 2 ч. Ч. 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество и магнетизм / И. И. Ташлыкова-Бушкевич. – 2-е изд., испр. – Минск : Вышэйшая школа, 2014. – 303 с. : ил.

ISBN 978-985-06-2505-2.

В части 1 рассмотрены нерелятивистская (ньютоновская) и релятивистская механика, включая колебательные и волновые процессы, а также молекулярная физика и термодинамика, электричество и магнетизм.

Содержание учебника соответствует современному уровню развития физики. Материал изложен в максимально доступной и наглядной форме.

В зависимости от тактических задач обучения учебник может быть использован для самостоятельной работы студентов, на аудиторных занятиях под руководством преподавателя, а также для заочной и дистанционной форм обучения.

Первое издание вышло в 2013 г.

Для студентов учреждений высшего образования по техническим специальностям.

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

ISBN 978-985-06-2505-2 (ч. 1)

ISBN 978-985-06-2507-6

© Ташлыкова-Бушкевич И. И., 2013

© Ташлыкова-Бушкевич И. И., 2014, с изменениями

© Оформление. УП «Издательство “Вышэйшая школа”», 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является первой частью учебника «Физика. В двух частях» и адресована студентам технических специальностей вузов, а также всем, кто изучает курс общей физики в течение одного, двух или трех семестров, включая студентов заочной и дистанционной форм обучения. Содержание учебника соответствует программе курса физики для технических специальностей вузов.

Цель книги состоит в следующем:

- обеспечить теоретическую подготовку студентов в области физики для ориентации в потоке современной научной и технической информации и использования знаний по физике в технике;
- в наиболее компактной форме дать такой объем теоретического материала, который необходим для понимания сути рассматриваемых физических явлений.

Актуальность учебника обусловлена, во-первых, существующим дефицитом учебных пособий по физике, согласованных с действующими учебными программами для специальностей инженерно-технического профиля вузов, а во-вторых, важностью обеспечения учебного процесса пособиями, отражающими современный уровень развития физики.

При подготовке издания были поставлены следующие задачи:

- дать возможность студентам самостоятельно работать над курсом, в том числе при подготовке к практическим и лабораторным занятиям;
- позволить лектору дополнять материал, читаемый на лекциях, наглядными примерами, приложениями физических законов в разных областях науки и техники, а также решениями классических задач для объяснения и иллюстрации изучаемых теоретических положений;
- достичь максимально высокого качества представления сложно конспектируемых учебных материалов, например графиков, иллюстраций и схем.

В первой части учебника изложены нерелятивистская (ньютоновская) и релятивистская механика, включая колебательные и волновые процессы, а также молекулярная физика и термодинамика, электричество и магнетизм. Во второй части рассматриваются оптика, квантовая физика, строение и физические свойства вещества. В работу включены оригиналь-

ные результаты научных исследований, выполненных автором в рамках проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, а также совместно с учеными России, Германии, Италии, Великобритании и Японии в области физики конденсированного состояния, физики водородного материаловедения и физики взаимодействия заряженных частиц с поверхностью кристаллов.

Отличительная особенность данного учебника — краткая и доступная форма изложения материала, в том числе физической сути изучаемых явлений, что помогает быстро овладеть основами курса общей физики. Каждый раздел структурирован в соответствии с наиболее важными вопросами и проблемами и содержит список литературы для углубленного знакомства с темами.

Все объяснения даются максимально просто. Усвоению физических формул и моделей способствуют многочисленные примеры и иллюстрации. В оформлении материала используется выделение формулировок законов, принципов, формул и терминов с помощью различных типографских средств, что облегчает восприятие и запоминание информации. Подробный предметный указатель позволяет легко ориентироваться в книге.

Учебник базируется на материале лекций, которые читает автор студентам Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Автор выражает признательность рецензентам пособия.

Автор

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Векторы обозначены одной буквой со стрелкой (например \vec{r} , \vec{v}); та же буква без стрелки (r , v) означает модуль вектора.

Средние величины отмечены скобками $\langle \rangle$, например $\langle v \rangle$, или с использованием индекса «ср», т.е. $v_{\text{ср}}$.

Скалярное произведение векторов \vec{a} и \vec{b} обозначается как $\vec{a} \cdot \vec{b}$, а также $\vec{a}\vec{b}$ или (\vec{a}, \vec{b}) .

Векторное произведение двух векторов \vec{a} и \vec{b} обозначается как $\vec{a} \times \vec{b}$ или $[\vec{a}, \vec{b}]$.

Символы перед величинами означают:

Δ – конечное приращение величины, т.е. разность ее конечного и начального значений, например $\Delta E_k = E_{k_2} - E_{k_1}$;

$-\Delta$ – убыль величины, т.е. разность ее начального и конечного значений, например $-\Delta E_p = E_{p_1} - E_{p_2}$;

d – дифференциал (бесконечно малое приращение), например $d\vec{r}$;

δ – элементарное значение величины, например элементарная работа δA ;

$=$ – равно;

\equiv – тождественно равно;

\approx – приблизительно равно;

\sim – пропорционально.

Орты – единичные векторы:

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты декартовых координат;

\vec{n} – орт нормали к контуру или элементу поверхности;

$\vec{\tau}$ – орт касательной к контуру или границе раздела.

Производная по времени от произвольной функции $f(t)$ обозначена df/dt или $\partial f/\partial t$, когда f – функция нескольких переменных, или точкой, стоящей над функцией, \dot{f} .

Производная n -го порядка от произвольной функции $f(x)$ обозначена $d^n f/dx^n$.

Математические символы:

\lim – предел функции;

∞ – бесконечность;

\Rightarrow – следует;

\rightarrow – стремится к ...;

\perp – перпендикулярно;

\parallel – параллельно;

$\uparrow\uparrow$ – параллельно и одинаково направлено;

$\uparrow\downarrow$ – параллельно и направлено в противоположные стороны;
 const – обозначение постоянства величины, например $\vec{E} = \text{const}$ – вектор \vec{E} постоянен по модулю и по направлению, $A = \text{const}$ – величина A является постоянной;

(\vec{a}, \vec{b}) – угол между векторами \vec{a} и \vec{b} ;

inv – обозначение величины инвариантной, т.е. одинаковой для всех инерциальных систем отсчета;

$\sum_{i=1}^n$ или \sum_i означает суммирование величины, стоящей справа от

\sum по всем индексам от $i = 1$ до $i = n$ включительно;

\int_a^b – определенный интеграл;

\int – неопределенный интеграл; в зависимости от элемента интегрирования, например dV – элемента объема, dS – элемента поверхности и dl – элемента контура, может быть записан соответственно как \int_V , \int_S и \int_L ;

\oint , или \oint_L , или \oint_S – интегрирование соответственно по замкнутому

контур или по замкнутой поверхности.

Векторный оператор $\vec{\nabla}$ (набла). Операции с ним обозначены так:

$\vec{\nabla} E_p$ – градиент E_p ($\text{grad } E_p$);

$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}$ – дивергенция \vec{E} ($\text{div } \vec{E}$);

$\vec{\nabla} \times \vec{E}$ – ротор \vec{E} ($\text{rot } \vec{E}$).

Оператор Лапласа Δ (лапласиан): $\Delta = \vec{\nabla}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$.

Обозначения и названия основных единиц физических величин

А – ампер	К – кельвин	рад – радиан
В – вольт	кал – калория	с – секунда
Вб – вебер	Кл – кулон	См – сименс
Вт – ватт	м – метр	Тл – тесла
г – грамм	мин – минута	Φ – фарад
Гн – генри	Н – ньютон	ч – час
Гц – герц	Ом – ом	эВ – электрон-вольт
Дж – джоуль	Па – паскаль	

ВВЕДЕНИЕ

Физика образует фундамент основных направлений техники, таких как радиотехника, электроника, электротехника и энергетика, строительная техника, гидротехника, светотехника, значительная часть военной техники. Поэтому можно утверждать, что физика – это фундаментальная основа подготовки инженера. Взаимосвязь физики и техники очевидна. Например, без овладения физическими законами тяготения ракеты и спутники не улетели бы в космос и человечество не получило бы многих новых данных об основах и принципах строения Вселенной. Без знаний закономерностей взаимодействия ускоренных ионов с полупроводниками нельзя было бы создать большинство полупроводниковых приборов, микросхем и целых компьютеров. Успехи в физике полупроводников совершили переворот в радиотехнике. С заменой радиоламп на полупроводниковые приборы, а затем на микросхемы и наноструктурные схемы повысилась надежность, снизилось потребление энергии.

В свою очередь конструирование полупроводниковых детекторов энергии частиц на базе ионно-имплантированных кристаллов позволило открыть новые физические законы и эффекты движения и рассеяния ускоренных частиц в кристаллах. Например, эффекты каналирования, теней позволили изучить в экспериментах пространственное распределение элементного состава, дефектов в ионно-облученных кристаллах, а также время жизни ядер и механизмы ядерных реакций. Это обеспечило создание соответствующих технологий в полупроводниковой промышленности.

Конечно, в современной физике остаются нерешенные проблемы. Перечислим некоторые из них:

- в физике твердого тела – проблемы сверхпроводимости при сравнительно высоких температурах; задачи получения материалов с экстремальными свойствами в отношении механической прочности, теплостойкости, электрических, магнитных, оптических характеристик. Например, в результате сверхбыстрой закалки из расплава создаются микроструктуры, характеризующиеся измельчением зерен, уменьшением размера выделений вторых фаз, расширением границ растворимости в твердом состоянии и образованием метастабильных кристаллических фаз. Получаемые быстрозатвердевшие сплавы широко используются для микроэлектроники, в аэрокосмической и транспортной промышленности;

- в астрофизике – состояние материи при огромных плотностях и давлениях внутри нейтронных звезд и «черных дыр»;

- в физике плазмы – работы над управляемым термоядерным синтезом; объяснение ускорения заряженных частиц при вспышках сверхновых звезд, излучения пульсаров и др.;

– в квантовой электронике – проблемы нелинейной оптики при создании лазеров с перестраиваемой частотой излучения, с повышенной мощностью;

– в физике элементарных частиц – создание обобщенной теории.

Отметим, что подлинная революция в экспериментальных исследованиях различных областей физики (взаимодействия элементарных частиц, физики твердого тела, квантовой электроники, радиоастрономии) связана с применением ЭВМ для обработки информации и моделирования физических процессов. Основное требование, предъявляемое к компьютерному моделированию, заключается в согласованности получаемых результатов с реальным экспериментом и существующими теориями. Например, исследование элементарного и композиционного составов образцов ядерно-физическим методом резерфордовского обратного рассеяния выполняются с использованием компьютерных моделирующих программ, таких как RUMP (РАМП), SIMNRA (СИМНРА).

Программа курса физики способствует формированию у студентов научного мировоззрения, на основе которого складываются основные представления о современной физической картине мира.

Цели курса:

– изучение основных понятий, законов, принципов и теорий классической и квантовой физики;

– изучение основных физических явлений и процессов и их трактовка с точки зрения современных научных представлений;

– формирование современного физического мышления и научного мировоззрения;

– ознакомление с методами физических исследований.

Основные задачи курса:

– теоретически подготовить студентов в области физики, включая основы физики на современном уровне ее развития, чтобы они могли ориентироваться в потоке научной и технической информации и использовать знания по физике в технике;

– ознакомить с современной научной аппаратурой, сформировать навыки проведения физического эксперимента и решения конкретных задач из отдельных разделов физики, умение оценивать степень достоверности результатов, полученных в экспериментальных или теоретических исследованиях.

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

ТЕМА 1. ФИЗИКА КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ НАУКА

1.1. Предмет физики. Важнейшие этапы развития физики

Физика (от греч. *physis* – природа) – это наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие свойства и законы движения окружающих нас объектов материального мира. **Материя** – познаваемая объективная реальность, все то, что окружает нас и что мы воспринимаем приборами или органами чувств. Понятия физики и ее законы лежат в основе всего естествознания. В античной культуре эта наука охватывала всю совокупность знаний о природных явлениях. По мере дифференциации знаний и методов исследований из нее выделились отдельные науки, в том числе физика в том виде, в котором мы ее используем и изучаем.

Физика – точная экспериментальная наука. Процесс познания мира бесконечен. Наши знания на каждой ступени развития науки обусловлены исторически достигнутым уровнем познания и не могут считаться окончательными, полными, они являются относительными, т.е. нуждаются в дальнейшем развитии, проверке и уточнении. Вместе с тем всякая научная теория содержит элементы абсолютного, т.е. полного, знания и означает определенную ступень в познании объективного мира. Например, развитие науки установило пределы, в которых справедлива ньютоновская механика. В настоящее время ньютоновская механика является составной частью физической науки в целом.

Несколько слов о взаимосвязи физики с другими разделами естествознания. Для всех наук естествознания (астрономии, биологии, химии и т.д.) общим языком является язык математики. Взаимопроникновение наук таково, что, например, сегодня самостоятельно развиваются и физическая химия (термин ввел Ломоносов в 1752 г.), и биофизика (1961 г.). Физическая химия включает такие разделы, как квантовая химия, физико-химическая механика, электрохимия и др., и объясняет химические явления, устанавливает их общие закономерности на основе принципов физики с использованием физических экспериментальных методов. Биофизика – раздел науки, посвященный изучению физических и физико-химических явлений в биологических объектах.

Физика включает ряд взаимосвязанных разделов. По изучаемым объектам выделяют физику твердых, жидких и газообразных тел, физику элементарных частиц и физических полей, физику ядра, физику атомов и молекул, физику плазмы. Изучая формы или процессы движения материи,

рассматривают механическое движение, тепловые процессы, электромагнитные явления, гравитационные, сильные и слабые взаимодействия. Выделяют механику материальных точек и твердых тел, механику сплошных сред, термодинамику, статистическую физику, электродинамику (включая оптику), теорию тяготения, квантовую механику и квантовую теорию поля.

Отметим, что механика как наука зародилась в эпоху греко-римской культуры около V в. до н.э. Однако первая фундаментальная физическая теория – классическая механика Ньютона – создана лишь в XVII в. С появлением механики Ньютона было показано, что задача науки заключается в отыскании наиболее общих количественно формулируемых законов природы.

ТЕМА 2. ЭЛЕМЕНТЫ КИНЕМАТИКИ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА

2.1. Материальная точка. Абсолютно твердое тело

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

Механическое движение – изменение взаимного расположения тел или их частей в пространстве с течением времени.

В *нерелятивистской (ньютоновской) механике* рассматривают механические движения макроскопических тел со скоростями, во много раз меньшими скорости света в вакууме. При этом выделяют следующие разделы: **кинматику**, которая изучает движение тел, не рассматривая причины, вызывающие это движение; **динамику**, которая изучает законы движения тел и причины, вызывающие или изменяющие это движение.

Для описания движения тел в зависимости от условий конкретных задач в механике используются следующие упрощенные физические модели.

Материальная точка (частица) – тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

Абсолютно твердое тело – тело, деформацией которого под действием приложенных сил в условиях данной задачи можно пренебречь. При этом расстояние между любыми двумя точками этого тела в процессе движения не меняется.

Абсолютно упругое тело – тело, которое после прекращения внешнего силового воздействия полностью восстанавливает свои первоначальные размеры и форму.

Абсолютно неупругое тело — тело, полностью сохраняющее деформированное состояние после прекращения действия внешних сил.

2.2. Система отсчета. Скалярные и векторные величины. Некоторые операции над векторами

Определим, что нужно знать для описания движения предметов в кинематике. Прежде всего любое измерение производится относительно какого-то тела отсчета, т.е. начинается с задания положения точки в пространстве. **Телом отсчета** называется произвольно выбранное абсолютно твердое тело, относительно которого определяется положение остальных тел.

Система отсчета — совокупность тела отсчета и системы пространственных координат, жестко связанной с телом отсчета и снабженной часами.

Геометрический вектор \vec{a} — направленный отрезок в пространстве. Длина вектора \vec{a} называется его модулем и обозначается $|\vec{a}| = a$.

Наиболее часто употребляется декартова система координат, ортонормированный базис которой образован тремя единичными по модулю и взаимно ортогональными векторами \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} , проведенными из начала координат (рис. 2.1). Положение произвольной точки M характеризуется **радиус-вектором** \vec{r} , соединяющим начало координат O с точкой M :

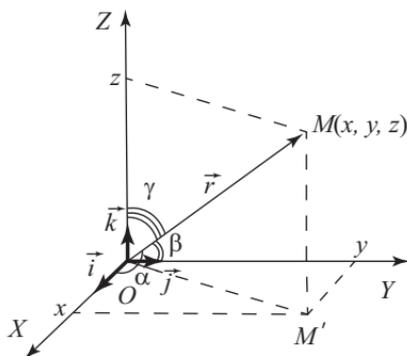


Рис. 2.1. Положение точки в декартовой системе координат

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

где $x = r \cos \alpha$, $y = r \cos \beta$, $z = r \cos \gamma$. Величины x , y , z называются **прямоугольными декартовыми координатами** вектора \vec{r} .

Кроме того, в механике используются сферическая и цилиндрическая системы координат, а также другие криволинейные системы координат.

Скалярные величины характеризуются только численным значением (время, температура и т.д.).

Приведем некоторые операции с векторами.

1. Сложение векторов. Сложением векторов \vec{a} и \vec{b} называется такой вектор \vec{c} , что $\vec{a} + \vec{b} = \vec{c}$, при этом $|\vec{a}| + |\vec{b}| \geq |\vec{c}|$.

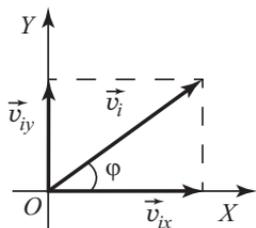


Рис. 2.2. Представление вектора \vec{v}_i в декартовой системе координат

Рассмотрим аналитический метод сложения векторов, например скорости \vec{v}_i , $i = 1, 2$ (рис. 2.2). Как известно, векторы, лежащие в плоскости, можно разложить на составляющие (компоненты). Поэтому в прямоугольной декартовой системе координат в плоскости каждый вектор можно однозначно представить в виде

$$\vec{v}_i = \vec{v}_{ix} + \vec{v}_{iy},$$

где $\vec{v}_{ix} = v_{ix} \vec{i}$; $\vec{v}_{iy} = v_{iy} \vec{j}$; проекции на оси X и Y определяются соответственно как $v_{ix} = v_i \cos \varphi$,

$v_{iy} = v_i \sin \varphi$; угол φ — угол, который составляет вектор \vec{v}_i с осью X . При этом $|\vec{v}_i| = v_i = \sqrt{v_{ix}^2 + v_{iy}^2}$, $\operatorname{tg} \varphi = \frac{v_{iy}}{v_{ix}}$.

Тогда при сложении векторов скорости получаем

$$\vec{v}_1 + \vec{v}_2 = (\vec{v}_{1x} + \vec{v}_{2x}) + (\vec{v}_{1y} + \vec{v}_{2y}) = (v_{1x} + v_{2x})\vec{i} + (v_{1y} + v_{2y})\vec{j}.$$

Аналогично определяется сложение векторов в случае трехмерного пространства.

2. Скалярное произведение. Скалярное произведение двух векторов \vec{a} и \vec{b} — это число

$$(\vec{a}, \vec{b}) = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos(\widehat{\vec{a}, \vec{b}}) = ab \cos \alpha = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z,$$

где α — угол между векторами \vec{a} и \vec{b} . Скалярное произведение обозначается также символами $\vec{a} \cdot \vec{b}$, $\vec{a} \vec{b}$.

3. Векторное произведение. Векторным произведением векторов \vec{a} и \vec{b} называется вектор \vec{c} , имеющий длину, равную произведению длин этих векторов на синус угла между ними, $c = ab \sin \varphi$, и направленный перпендикулярно к \vec{a} и \vec{b} , как показано на рис. 2.3, в соответствии с *правилом правой руки*: правую руку направляют вдоль первоначального вектора \vec{a} таким образом, чтобы, сгибая пальцы, можно было направить их вдоль вектора \vec{b} . Большой палец правой руки будет показывать направление вектора \vec{c} .

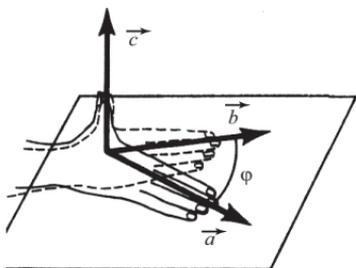


Рис. 2.3. Направление вектора $\vec{c} = [\vec{a}, \vec{b}]$

Обозначение: $\vec{c} = [\vec{a}, \vec{b}] = \vec{a} \times \vec{b}$. В декартовой системе координат

$$[\vec{a}, \vec{b}] = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = (a_y b_z - a_z b_y) \vec{i} - (a_x b_z - a_z b_x) \vec{j} + (a_x b_y - a_y b_x) \vec{k}.$$

Отметим, что если модуль и направление вектора \vec{a} зависят от некоторого параметра t , то такой вектор \vec{a} называют векторной функцией переменной t и записывают в виде $\vec{a} = \vec{a}(t)$ или через проекции

$$a_x = a_x(t), \quad a_y = a_y(t), \quad a_z = a_z(t).$$

Если проекции векторной функции $\vec{b} = \vec{b}(x, y, z)$ представляют собой частные производные от некоторой функции u , зависящей от x, y и z :

$$b_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad b_y = \frac{\partial u}{\partial y}, \quad b_z = \frac{\partial u}{\partial z},$$

то \vec{b} записывается в виде

$$\vec{b} = \text{grad } u = \vec{\nabla} u$$

и называется **градиентом** u . Использованный здесь дифференциальный **оператор набла** $\vec{\nabla}$ записывается как $\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ в декартовых координатах.

2.3. Кинематика точки. Путь. Перемещение

В выбранной системе отсчета положение материальной точки полностью определено, если ее координаты заданы в зависимости от времени:

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t). \quad (2.1)$$

Уравнения (2.1) называются **кинематическими уравнениями движения** материальной точки. Они эквивалентны векторному уравнению

$$\vec{r} = \vec{r}(t), \quad (2.2)$$

где радиус-вектор $\vec{r}(t)$ — функция, выражающая положение точки в любой момент времени. Уравнение (2.2) является **кинематическим законом движения** частицы.

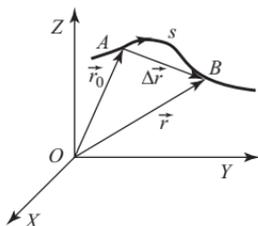


Рис. 2.4. Траектория частицы. В начальный момент времени частица находится в точке A , положение которой определяется радиус-вектором \vec{r}_0

Траектория — линия, вдоль которой происходит движение материальной точки (или тела) с течением времени (рис. 2.4). Геометрическая форма траектории зависит от выбора системы отсчета.

Длиной пути s точки называется длина участка траектории, пройденного этой точкой за рассматриваемый промежуток времени (рис. 2.4). Длина пути — скалярная функция времени и всегда выражается положительным числом.

Вектор перемещения $\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$ — вектор, проведенный из начального положения движущейся точки в положение ее в данный момент времени (приращение радиус-вектора точки за рассматриваемый промежуток времени, рис. 2.4):

$$\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0 = \vec{r}(t) - \vec{r}(t_0).$$

В пределе $\Delta t \rightarrow 0$ модуль элементарного перемещения равен элементарному пути: $|d\vec{r}| = ds$.

Для установления количественных соотношений между физическими величинами их необходимо сравнивать с соответствующими эталонами. **Международная система единиц**, обозначаемая символом СИ (SI), — это универсальная система единиц физических величин, охватывающая все отрасли науки и техники. Поэтому в дальнейшем при выполнении расчетов значения величин будем выражать в единицах СИ. Так, длина пути измеряется в метрах (м), масса — в килограммах (кг), время — в секундах (с) и т.д.

2.4. Скорость и ускорение. Вычисление пройденного пути

В физике важнейшей кинематической характеристикой движения является скорость. **Скорость** — векторная физическая величина, которая определяет как быстроту движения, так и его направление в данный момент времени.

Вектором средней скорости за интервал времени Δt называется отношение приращения $\Delta\vec{r}$ радиус-вектора точки к промежутку времени Δt :

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}. \quad (2.3)$$

Направление вектора средней скорости совпадает с направлением $\Delta\vec{r}$.

Мгновенная скорость материальной точки — средняя скорость за бесконечно малый интервал времени, определяемая как векторная величина,

равная первой производной по времени от радиус-вектора \vec{r} рассматриваемой точки:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}}. \quad (2.4)$$

Вектор мгновенной скорости направлен по касательной к траектории в сторону движения. Модуль мгновенной скорости (скалярная величина) равен первой производной пути по времени:

$$v = |\vec{v}| = \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \right| = \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta s} \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} \right| = \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta s} \right| \cdot \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta s|}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} = \dot{s}, \quad (2.5)$$

где s — путь, пройденный вдоль траектории.

Единица скорости в СИ — метр в секунду (м/с).

Проекции скорости v_x , v_y и v_z на оси прямоугольных декартовых координат равны первым производным по времени от соответствующих координат движущейся точки:

$$v_x = \dot{x}, \quad v_y = \dot{y}, \quad v_z = \dot{z},$$

поскольку векторы \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} не изменяются по времени. Модуль вектора скорости определяется как

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

При *неравномерном движении* модуль мгновенной скорости с течением времени изменяется. Поэтому вводят следующую скалярную величину.

Средняя скорость неравномерного движения (средняя путевая скорость) — пройденное телом расстояние s , деленное на время, затраченное на прохождение этого расстояния:

$$v_{\text{cp}} = \langle v \rangle = \frac{s}{\Delta t}. \quad (2.5a)$$

Длина пути s , пройденного точкой за промежуток времени от t_1 до t_2 , задается интегралом, как следует из уравнения (2.5):

$$ds = v dt,$$

и поэтому

$$s = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt. \quad (2.6)$$

В зависимости от формы траектории различают *прямолинейное* и *криволинейное* движение точки. Если траектория точки лежит в одной плоскости, т.е. это плоская кривая, то движение точки называют *плоским*.

Движение точки называется **равномерным**, если точка в любые равные промежутки времени проходит равные расстояния. При этом модуль скорости точки не изменяется с течением времени: $v_{\text{cp}} = v$. Длина пути, пройденного равномерно движущейся точкой, является линейной функцией времени:

$$s = v \int_t^{t+\Delta t} dt = v \Delta t. \quad (2.7)$$

Если модуль скорости увеличивается с течением времени, то движение называется *ускоренным*, если же он убывает с течением времени, то движение называется *замедленным*.

Ускорение – векторная физическая величина, характеризующая изменение скорости движущейся точки \vec{v} .

Мгновенное ускорение материальной точки – векторная величина, определяемая как изменение скорости в единицу времени:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \dot{\vec{v}}. \quad (2.8)$$

Следовательно, мгновенное ускорение точки – векторная величина, равная второй производной по времени от ее радиус-вектора:

$$\vec{a} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \ddot{\vec{r}}. \quad (2.9)$$

Единица ускорения в СИ – метр на секунду в квадрате (м/с^2).

Используя формулы (2.8) и (2.9), получаем

$$\vec{a} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \cdot \vec{i} + \frac{dy}{dt} \cdot \vec{j} + \frac{dz}{dt} \cdot \vec{k} \right) = \frac{d^2x}{dt^2} \cdot \vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \cdot \vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2} \cdot \vec{k} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}, \quad (2.10)$$

где a_x , a_y и a_z – проекции вектора ускорения на координатные оси X , Y и Z соответственно. Модуль вектора ускорения

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}. \quad (2.11)$$

Поскольку $\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt}$, то можно записать, что $d\vec{v} = \vec{a}(t)dt$. Тогда **кинематический закон изменения скорости** будет иметь вид

$$\vec{v} = \int \vec{a}(t) dt. \quad (2.12)$$

Следовательно, проекции вектора скорости v_x , v_y и v_z определяются как

$$v_x = \int a_x(t) dt, \quad v_y = \int a_y(t) dt, \quad v_z = \int a_z(t) dt.$$

2.5. Тангенциальное и нормальное ускорения

Рассмотрим общий случай плоского криволинейного движения — ситуацию, когда материальная точка движется по произвольной траектории в плоскости. Траекторию можно разбить на такие отрезки, что каждый отрезок траектории будет совпадать с дугой окружности с центром в некоторой точке O . Эту точку называют **центром кривизны траектории** (рис. 2.5), а радиус R соответствующей окружности — **радиусом кривизны траектории** в той же точке ($R_A = AO$ на рис. 2.5). Например, для окружности радиус кривизны R постоянен. Для прямой линии $R = \infty$. Для прочих кривых значения радиуса кривизны меняются от точки к точке.

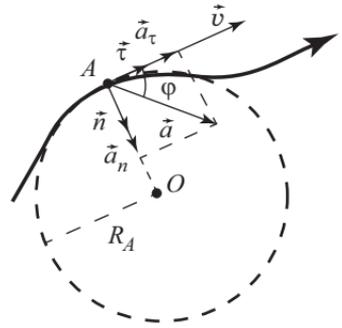


Рис. 2.5. Компоненты вектора ускорения \vec{a} при движении частицы по произвольной траектории

Вектор ускорения \vec{a} принято раскладывать на две составляющие — касательную \vec{a}_t (вдоль вектора скорости \vec{v} по касательной к траектории) и нормальную \vec{a}_n (в перпендикулярном направлении) (рис. 2.5):

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n, \quad a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}, \quad (2.13)$$

где $\vec{a}_t = a_t \vec{\tau}$; $\vec{a}_n = a_n \vec{n}$; a_t — **тангенциальное ускорение**; a_n — **нормальное (центростремительное) ускорение**. При этом $a_t = a \cos \varphi$, $a_n = a \sin \varphi$, $\operatorname{tg} \varphi = a_n / a_t$ (рис. 2.5). Единичный **вектор касательной** $\vec{\tau}$ направлен по касательной к траектории в точке A в сторону движения точки, единичный **вектор нормали** \vec{n} к траектории в точке A направлен к центру кривизны. Орты $\vec{\tau}$ и \vec{n} всегда перпендикулярны друг другу.

Тангенциальное \vec{a}_t и нормальное \vec{a}_n ускорения характеризуют соответственно изменение скорости по величине (по модулю) и изменение направления вектора скорости точки:

$$\vec{a}_t = \frac{dv}{dt} \vec{\tau}, \quad \vec{a}_n = \frac{v^2}{R} \vec{n}. \quad (2.13a)$$

Движение точки называется *равнопеременным*, если при этом движении тангенциальное ускорение a_t точки постоянно. В случае *равноускоренного* движения $a_t = \text{const} > 0$. При *равнозамедленном* движении $a_t = \text{const} < 0$.

Рассмотрим следующие частные виды движения:

- 1) прямолинейное равномерное движение, $a = 0$: $a_t = 0$, $a_n = 0$;
- 2) равномерное движение по окружности, когда величина модуля скорости сохраняется в любой момент времени, $a = \text{const}$: $a_t = 0$, $a_n = a = v^2/R$;
- 3) прямолинейное равнопеременное движение, $R = \infty$: $\vec{a}_t = \vec{a} = \text{const}$, $\vec{a}_n = \vec{0}$.

2.6. Кинематика твердого тела

Различают пять видов движения твердого тела: 1) поступательное; 2) вращение вокруг неподвижной оси; 3) плоское движение; 4) движение вокруг неподвижной точки и 5) свободное движение. Первые два рассматриваются как основные виды движения твердого тела.

Поступательное движение – такое движение, при котором любой выделенный в теле отрезок остается со временем параллельным самому себе.

Число степеней свободы твердого тела i – минимальное число независимых координат, однозначно определяющих положение твердого тела в пространстве.

Рассмотрим поступательное движение произвольного тела (рис. 2.6). Очевидно, что число степеней свободы тела в данном случае равно трем, так как достаточно описать движение какой-нибудь одной точки тела, например точки A , в декартовой системе координат. Траектории всех остальных точек (например, точки B) могут быть получены путем «параллельного» переноса в пространстве.

Допустим, $\vec{r}_A = \vec{r}_A(t)$ – закон движения точки A . Тогда закон движения точки B будет иметь вид

$$\vec{r}_B = \vec{r}_A + \vec{r}_{AB},$$

где \vec{r}_{AB} – вектор, проведенный от точки A к точке B , постоянный по величине (*абсолютно твердое тело*) и направлению (*поступательное движение*).

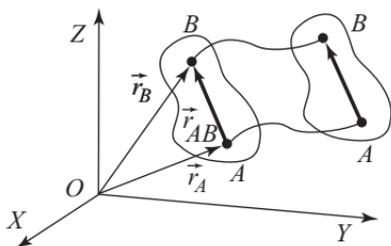


Рис. 2.6. Пример поступательного движения произвольного твердого тела

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	5
Обозначения и названия основных единиц физических величин	6
ВВЕДЕНИЕ	7
РАЗДЕЛ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ	9
Тема 1. Физика как фундаментальная наука	9
1.1. Предмет физики. Важнейшие этапы развития физики	9
Тема 2. Элементы кинематики материальной точки и твердого тела	10
2.1. Материальная точка. Абсолютно твердое тело	10
2.2. Система отсчета. Скалярные и векторные величины. Некоторые операции над векторами	11
2.3. Кинематика точки. Путь. Перемещение	13
2.4. Скорость и ускорение. Вычисление пройденного пути	14
2.5. Тангенциальное и нормальное ускорения	17
2.6. Кинематика твердого тела	18
2.7. Вращение твердого тела вокруг неподвижной оси	19
2.8. Угловая скорость и ускорение	20
2.9. Связь между угловыми и линейными скоростями и ускорениями	22
Тема 3. Элементы динамики материальной точки	23
3.1. Границы применимости ньютоновской механики. Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета. Масса и импульс. Силы внутренние и внешние	23
3.2. Второй закон Ньютона как уравнение движения	25
3.3. Третий закон Ньютона	26
3.4. Принцип относительности Галилея. Преобразования Галилея	27
3.5. Закон всемирного тяготения. Масса инертная и гравитационная	29
3.6. Гравитационное поле и его характеристика	30
3.7. Сила тяжести и вес	31
3.8. Упругие силы. Закон Гука. Сухое и жидкое трение	32
Тема 4. Законы сохранения	34
4.1. Замкнутая система. Сохраняющиеся величины. Связь законов сохранения со свойствами пространства и времени	34
4.2. Импульс силы	35
4.3. Закон сохранения импульса	36
4.4. Центр масс. Уравнение движения центра масс. Система центра масс	37

4.5. Работа и мощность силы	39
4.6. Кинетическая энергия материальной точки и закон ее изменения. Консервативные и диссипативные силы	40
4.7. Потенциальная энергия частицы в поле. Энергия упругой деформации. Связь между потенциальной энергией и силой поля	42
4.8. Полная механическая энергия частицы и закон ее сохранения. Механическая энергия системы. Законы ее сохранения	44
4.9. Примеры применения законов сохранения импульса и механической энергии	47
4.10. Космические скорости	50
4.11. Моменты импульса частицы относительно точки и оси. Момент силы. Пара сил	52
4.12. Момент импульса системы и закон его изменения. Закон сохранения момента импульса	56
Тема 5. Механика твердого тела	59
5.1. Момент импульса тела, вращающегося относительно неподвижной оси. Момент инерции тела относительно оси. Теорема Штейнера	59
5.2. Уравнение динамики твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси	63
5.3. Кинетическая энергия твердого тела, вращающегося вокруг фиксированной оси. Работа внешних сил при вращении тела (ось вращения неподвижна)	64
5.4. Плоское движение твердого тела. Уравнение динамики плоского движения. Кинетическая энергия твердого тела при плоском движении	65
5.5. Тензор инерции твердого тела и главные оси инерции	67
Тема 6. Неинерциальные системы отсчета	69
6.1. Уравнение движения в неинерциальных системах отсчета, движущихся поступательно	69
6.2. Вращающиеся неинерциальные системы отсчета. Центробежная сила инерции и сила Кориолиса (без вывода)	72
6.3. Принцип эквивалентности Эйнштейна	74
6.4. Работа внешних сил при вращении твердого тела	75
6.5. Гироскопы. Гироскопический эффект	76
6.6. Прецессия и нутация гироскопа	78
Тема 7. Колебательные процессы	80
7.1. Гармонические колебания	80
7.2. Уравнение гармонических колебаний без трения. Его решение	83
7.3. Гармонический осциллятор. Пружинный, физический и математический маятник (малые колебания)	84
7.4. Энергия гармонических колебаний	88
7.5. Уравнение затухающих колебаний и его решение. Коэффициент затухания	90
7.6. Логарифмический декремент затухания. Добротность	92
7.7. Уравнение вынужденных колебаний и его решение. Векторная диаграмма	93
7.8. Резонанс. Резонансные кривые. Параметрический резонанс. Автоколебания	96
Тема 8. Волновые процессы	98
8.1. Распространение волн в упругой среде. Продольные и поперечные волны. Длина и скорость волн	98

8.2. Плоские и сферические волны. Волновое уравнение	101
8.3. Интерференция волн. Плоские стоячие волны	103
8.4. Энергия упругой волны. Поток и плотность потока энергии. Вектор Умова	105
Тема 9. Специальная теория относительности	108
9.1. Опыт Майкельсона – Морли. Постулаты специальной теории относительности	108
9.2. Преобразования Лоренца	111
9.3. Одновременность и синхронизация часов. Собственное время частицы	114
9.4. Относительность длин и промежутков времени	116
9.5. Интервал между событиями. Его инвариантность	119
9.6. Причинность	122
9.7. Релятивистский закон преобразования скоростей	123
9.8. Релятивистский импульс. Уравнение движения релятивистской частицы	126
9.9. Взаимосвязь массы и энергии. Энергия покоя	128
<i>Литература</i>	131
РАЗДЕЛ 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА	132
Тема 10. Основные понятия статистической физики и термодинамики	132
10.1. Макроскопическая система и ее термодинамическое состояние. Статистический и термодинамический методы исследования	132
10.2. Физический смысл температуры	133
10.3. Уравнение состояния идеального газа	134
10.4. Средняя энергия молекулы. Уравнение молекулярно-кинетической теории для давления газа	139
10.5. Внутренняя энергия идеального газа	141
10.6. Закон равнораспределения энергии	142
10.7. Теплоемкость идеального газа	143
Тема 11. Начала термодинамики	145
11.1. Первое начало термодинамики	145
11.2. Изопроцессы. Уравнение адиабаты	148
11.3. Вероятность и флуктуации. Смысл статистического описания: малость относительной флуктуации	151
11.4. Распределение Максвелла. Средняя, средняя квадратичная и наиболее вероятная скорости молекул	154
11.5. Распределение молекул во внешнем поле. Распределение Больцмана. Распределение Максвелла — Больцмана	156
11.6. Второе начало термодинамики. КПД теплового двигателя. Обратимые и необратимые процессы	159
11.7. Термодинамический цикл. Энтропия. Неравенство Клаузиуса. Закон возрастания энтропии	161
11.8. Статистический смысл энтропии. Энтропия и необратимость	163
11.9. Идеальная тепловая машина и ее КПД. Цикл Карно	165
11.10. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса	169
<i>Литература</i>	170

РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ	172
Тема 12. Электростатическое поле в вакууме	172
12.1. Закон сохранения электрического заряда. Электрическое поле. Закон Кулона	172
12.2. Напряженность \vec{E} электростатического поля. Силовые линии. Принцип суперпозиции полей	175
12.3. Теорема Гаусса для электростатического поля. Поток и дивергенция вектора \vec{E}	178
12.4. Применение теоремы Гаусса к расчету напряженности электростатического поля	182
12.5. Теорема о циркуляции вектора \vec{E} . Потенциал. Потенциал поля точечного заряда	183
12.6. Связь потенциала и напряженности поля. Потенциал поля системы зарядов	186
12.7. Электрический диполь. Момент сил, действующий на диполь. Энергия диполя в поле	189
12.8. Проводники в электрическом поле	192
12.9. Поле внутри заряженного проводника и у его поверхности. Распределение заряда в проводнике	194
12.10. Электроемкость уединенного проводника	196
12.11. Взаимная емкость двух проводников. Конденсаторы	197
12.12. Электростатическое поле системы зарядов на большом расстоянии	199
Тема 13. Электростатическое поле в диэлектрике	201
13.1. Диэлектрики в электростатическом поле	201
13.2. Поляризованность. Диэлектрическая восприимчивость. Диэлектрическая проницаемость	203
13.3. Вектор \vec{D} (электрическое смещение). Теорема Гаусса для вектора \vec{D}	207
13.4. Поле в диэлектрике. Условия на границе двух диэлектриков	209
13.5. Энергия электрического поля. Электрическая энергия системы зарядов. Энергия уединенного проводника. Энергия конденсатора. Плотность энергии	213
Тема 14. Постоянный электрический ток	218
14.1. Сила и плотность тока. Уравнение непрерывности	218
14.2. Закон Ома для однородного проводника. Закон Ома в дифференциальной форме	221
14.3. Сторонние силы. ЭДС	222
14.4. Обобщенный закон Ома в дифференциальной форме. Закон Ома для неоднородного участка цепи	226
14.5. Закон Джоуля – Ленца	229
Тема 15. Магнитное поле в вакууме	231
15.1. Магнитная индукция \vec{B} . Магнитное поле равномерно движущегося заряда. Принцип суперпозиции полей	231
15.2. Закон Био – Савара – Лапласа и его применение к расчету магнитного поля прямого и кругового токов	235
15.3. Теорема Гаусса для вектора \vec{B} . Векторный потенциал магнитостатического поля	238
15.4. Теорема о циркуляции вектора \vec{B}	240
15.5. Применение теоремы о циркуляции вектора \vec{B} к расчету полей. Поле соленоида	241

15.6. Сила Ампера	243
15.7. Магнитный момент контура с током. Сила, действующая на контур с током. Работа при перемещении контура с током	245
Тема 16. Магнитное поле в веществе	248
16.1. Намагниченность. Токи намагничивания	248
16.2. Циркуляция намагниченности. Вектор \vec{H} (напряженность магнитного поля)	249
16.3. Теорема о циркуляции вектора \vec{H}	250
16.4. Ферромагнетизм	253
Тема 17. Явление электромагнитной индукции	255
17.1. Опыты Фарадея. Правило Ленца	255
17.2. Закон электромагнитной индукции. Полный магнитный поток (потокосцепление). Токи Фуко	256
17.3. Явление самоиндукции. Индуктивность. ЭДС самоиндукции. Индуктивность соленоида	259
17.4. Ток при замыкании и размыкании цепи	261
17.5. Явление взаимной индукции	262
17.6. Энергия контура с током. Энергия магнитного поля. Плотность энергии магнитного поля	263
Тема 18. Электромагнитные колебания	266
18.1. Квазистационарные токи. Свободные колебания в контуре без активного сопротивления	266
18.2. Свободные затухающие электрические колебания	269
18.3. Вынужденные электрические колебания	271
Тема 19. Переменное электромагнитное поле в вакууме. Уравнения Максвелла	274
19.1. Вихревое электрическое поле. Ток смещения	274
19.2. Уравнения Максвелла. Относительность электрического и магнитного полей. Переменное электромагнитное поле	277
Тема 20. Электромагнитные волны	281
20.1. Волновое уравнение для электромагнитной волны. Основные свойства электромагнитной волны: скорость, поперечность, связь между \vec{E} и \vec{H}	281
20.2. Опыты Герца. Излучение диполя Герца	283
20.3. Плотность энергии электромагнитной волны. Вектор Пойнтинга. Опыт Лебедева	284
<i>Литература</i>	287
ПРИЛОЖЕНИЕ	288
1. Греческий алфавит	288
2. Некоторые физические константы	288
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	290

Учебное издание

Ташлыкова-Бушкевич Ия Игоревна

ФИЗИКА

В двух частях

Часть 1

**Механика. Молекулярная физика и термодинамика.
Электричество и магнетизм**

Учебник

2-е издание, исправленное

Редактор *Е.В. Савицкая*
Художественный редактор *Т.В. Шабунько*
Технический редактор *Н.А. Лебедевич*
Корректоры *В.И. Аверкина, Н.Г. Баранова*
Компьютерная верстка *А.Н. Бабенковой*

Подписано в печать 12.09.2014. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура «NewtonС». Офсетная печать. Усл. печ. л. 17,67.
Уч.-изд. л. 16,5. Тираж 1000 экз. Заказ 1657.

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 «Типография “Победа”».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, производителя
и распространителя печатных изданий № 2/38 от 28.10.2013.
Ул. Тавлая, 11, 222310, Молодечно.