

В.Н. Федорова
Е.В. Фаустов

ФИЗИКА

2-е издание, переработанное и дополненное

УЧЕБНИК ДЛЯ УЧИЛИЩ И КОЛЛЕДЖЕЙ

Министерство образования и науки РФ

Рекомендовано ГОУ ВПО «Московская медицинская академия имени И.М. Сеченова» в качестве учебника для студентов учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по специальностям 34.02.01 (060501.51) «Сестринское дело» и 31.02.03 (060110.51) «Лабораторная диагностика» по дисциплине «Физика»



Москва
ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА
«ГЭОТАР-Медиа»
2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	10
МЕХАНИКА	11
ГЛАВА 1. Кинематика	12
§ 1.1. Механическое движение. Система отсчета. Материальная точка. Траектория, путь и перемещение	12
§ 1.2. Скорость и ускорения движения тела.	15
§ 1.3. Относительность движения. Сложение скоростей.	16
§ 1.4. Равномерное прямолинейное движение, графики.	18
§ 1.5. Прямолинейное движение с постоянным ускорением, графики.	20
§ 1.6. Свободное падение и его ускорение. Движение тела, брошенного под углом к горизонту	22
§ 1.7. Вращение тела вокруг оси. Движение тела по окружности, центростремительное ускорение	25
Основные понятия и формулы	28
Задачи	30
ГЛАВА 2. Динамика. Элементы статики	43
Динамика материальной точки	43
§ 2.1. Первый закон Ньютона, инерциальная система отсчета. Принцип относительности Галилея	43
§ 2.2. Масса. Сила. Второй закон Ньютона для материальной точки. Сложение и разложение сил.	45
§ 2.3. Третий закон Ньютона.	47
Динамика реального тела	48
§ 2.4. Центр масс. Внешние и внутренние силы. Второй закон Ньютона для реального тела	48
Некоторые реальные силы, встречающиеся в механике	51
§ 2.5. Земная сила тяжести, динамометр и пружинные весы	52
§ 2.6. Закон всемирного тяготения. Гравитационное поле	54
§ 2.7. Движение искусственных спутников, первая космическая скорость. Вторая космическая скорость.	56
§ 2.8. Силы упругости. Закон Гука.	57
§ 2.9. Силы, действующие на тело со стороны твердой поверхности: сила нормального давления, силы трения. Коэффициент трения.	58
§ 2.10. Основные силы, встречающиеся в задачах по механике	62
Неинерциальные системы отсчета	65
§ 2.11. Силы инерции. Принцип Даламбера. Сила тяжести (общее понятие)	66
§ 2.12. Вес тела. Перегрузки и невесомость	68

Оглавление	Элементы статики	72
	§ 2.13. Момент силы, правило моментов.	
	Рычаги и их применение	72
	Основныe понятия и формулы	77
	Задачи	81
 ГЛАВА 3. Законы сохранения в механике		95
§ 3.1. Импульс. Закон сохранения импульса. Реактивное движение. Значение работ К.Э. Циолковского для космонавтики		95
§ 3.2. Кинетическая энергия и механическая работа. Мощность		99
§ 3.3. Работы основных сил механики		102
§ 3.4. Потенциальные силы, потенциальная энергия. Принцип минимума потенциальной энергии.		105
§ 3.5. Полная механическая энергия, закон сохранения энергии в механике		109
§ 3.6. Работа и мощность человека		110
Основныe понятия и формулы		111
Задачи		113
 ГЛАВА 4. Элементы гидростатики и гидродинамики		122
Гидростатика		122
§ 4.1. Давление. Закон Паскаля. Гидравлический пресс.		122
§ 4.2. Сообщающиеся сосуды. Барометры и манометры		127
§ 4.3. Закон Архимеда. Условия плавания тел		130
§ 4.4. Всестороннее сжатие. Разность давлений и деформация.		132
Элементы гидродинамики		134
§ 4.5. Расчет объема жидкости, протекающей по трубе, уравнение неразрывности. Зависимость давления жидкости от скорости ее течения, уравнение Бернулли		134
§ 4.6. Кровеносная система человека.		136
Основныe понятия и формулы		137
Задачи		138
 МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ЭЛЕМЕНТЫ ТЕРМОДИНАМИКИ		143
 ГЛАВА 5. Основы молекулярно-кинетической теории		144
§ 5.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории и их опытное обоснование. Диффузия и броуновское движение. Взаимодействие молекул.		144
§ 5.2. Строение газообразных, жидких и твердых тел. Агрегатные состояния		147
§ 5.3. Атомная единица массы, атомная масса, молекулярная масса. Постоянная Авогадро. Моль, молярная масса (историческая справка)		148

§ 5.4. Моль, постоянная Авогадро, молярная масса (СИ). Количество вещества. Массы и размеры молекул	152
§ 5.5. Идеальный газ. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа. Средняя квадратичная скорость движения молекул	153
§ 5.6. Температура и ее измерение. Тепловое равновесие.	155
§ 5.7. Термодинамическая температурная шкала. Энергетический смысл термодинамической температуры. Применение низких температур в медицине	157
§ 5.8. Уравнение состояния идеального газа (Менделеева–Клапейрона), универсальная газовая постоянная. Смесь газов, закон Дальтона	159
§ 5.9. Переход газа из одного состояния в другое. Изопроцессы и их графики. Легочное дыхание	161
§ 5.10. Испарение и конденсация. Насыщенный и ненасыщенный пары. Водяной пар в атмосфере, влажность воздуха	163
§ 5.11. Высыхание влажных поверхностей. Конденсация пара в атмосфере, точка росы	168
§ 5.12. Кипение жидкостей. Зависимость температуры кипения от давления	171
§ 5.13. Свободная поверхность жидкости, поверхностная энергия. Поверхностное натяжение. Граница жидкости и твердого тела. Капиллярные явления	172
Основные понятия и формулы	176
Задачи	180
ГЛАВА 6. Основы термодинамики.	186
§ 6.1. Внутренняя энергия тела (термодинамической системы). Внутренняя энергия идеального газа	186
§ 6.2. Способы изменения внутренней энергии. Количество теплоты.	188
§ 6.3. Нагревание, удельная теплоемкость вещества. Плавление, удельная теплота плавления. Парообразование, удельная теплота парообразования	190
§ 6.4. Уравнение теплового баланса.	192
§ 6.5. Первый закон термодинамики. Работа, совершаемая в изобарном процессе	195
§ 6.6. Применение первого закона термодинамики к изопроцессам идеального газа. Адиабатный процесс. Необратимость тепловых процессов.	196
§ 6.7. Принцип действия тепловых двигателей. КПД теплового двигателя и его максимальное значение. Охрана окружающей среды	197

Оглавление	§ 6.8. Первое начало термодинамики в жизнедеятельности организма. Физические основы терморегуляции живого организма	199
	Основные понятия и формулы	201
	Задачи	203
	ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ	209
ГЛАВА 7. Электростатика	210	
§ 7.1. Заряды элементарных частиц. Заряды ионов и макроскопических тел. Закон сохранения заряда	210	
§ 7.2. Взаимодействие заряженных тел. Закон Кулона	212	
§ 7.3. Электрическое поле. Напряженность электрического поля	214	
§ 7.4. Электрическое поле точечного заряда. Принцип суперпозиции полей. Однородное электрическое поле.	217	
§ 7.5. Работа кулоновских сил при перемещении заряда. Потенциал и разность потенциалов. Связь между напряженностью и разностью потенциалов в однородном поле	219	
§ 7.6. Графическое изображение электрических полей.	221	
§ 7.7. Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Диэлектрическая проницаемость вещества.	223	
§ 7.8. Конденсатор, емкость, энергия электрического поля. Емкость плоского конденсатора	225	
§ 7.9. Биопотенциалы	228	
Основные понятия и формулы	229	
Задачи	232	
ГЛАВА 8. Постоянный электрический ток.	234	
§ 8.1. Электрический ток. Сила тока. Сопротивление проводника. Закон Ома для участка цепи	234	
§ 8.2. Последовательное и параллельное соединение проводников	237	
§ 8.3. Работа и мощность тока. Закон Джоуля–Ленца	239	
§ 8.4. Источники тока. Электродвижущая сила. Закон Ома для полной цепи	240	
§ 8.5. Электронная проводимость металлов. Сверхпроводимость	241	
§ 8.6. Электрический ток в растворах и расплавах электролитов. Закон Фарадея для электролиза.	243	
§ 8.7. Электрический ток в газах	244	
§ 8.8. Электрический ток в вакууме	246	
§ 8.9. Электрический ток в полупроводниках	247	
§ 8.10. Действие постоянного тока на человека	251	
Основные понятия и формулы	252	
Задачи	256	

ГЛАВА 9. Магнитное поле. Электромагнитная индукция.	263
§ 9.1. Магнитное взаимодействие токов. Магнитное поле. Магнитная индукция	263
§ 9.2. Магнитные свойства вещества. Магнитная проницаемость. Ферромагнетизм	266
§ 9.3. Графическое изображение магнитного поля. Соленоид.	268
§ 9.4. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, закон Ампера. Правило левой руки. Сила Лоренца	269
§ 9.5. Электромагнитная индукция, опыт Фарадея. Магнитный поток	272
§ 9.6. Вихревое электрическое поле. Закон электромагнитной индукции, правило Ленца. Токи Фуко.	273
§ 9.7. Явление самоиндукции. Индуктивность. Энергия магнитного поля	276
§ 9.8. Магнитобиология, биомагнетизм	277
§ 9.9. Магнитное поле Земли и его роль в защите биологической жизни	279
Основные понятия и формулы	281
Задачи	284
 КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ	 289
 ГЛАВА 10. Механические колебания и волны	 290
§ 10.1. Периодические колебания. Период и частота колебаний. Размах колебаний	290
§ 10.2. Гармонические колебания. Амплитуда, период и частота колебаний	292
§ 10.3. Положения равновесия, свободные колебания. Свободные гармонические колебания при отсутствии трения. Колебания тела на пружине, колебания математического маятника.	294
§ 10.4. Превращения энергии при свободных гармонических колебаниях. Затухание свободных колебаний при наличии трения. Вынужденные колебания. Резонанс	296
§ 10.5. Вибрация	298
§ 10.6. Упругие волны, частота волны. Продольные и поперечные волны	300
§ 10.7. Волновой фронт. Скорость и длина волны.	302
§ 10.8. Уравнение плоской волны	304
§ 10.9. Интерференция и дифракция волн.	305
§ 10.10. Звук и скорость его распространения. Звуковое давление, спектр звука. Тембр и высота звука. Звуковые методы исследования	308
Основные понятия и формулы	309
Задачи	312

Оглавление	ГЛАВА 11. Электромагнитные колебания и волны	317
	§ 11.1. Электромагнитные колебания. Колебательный контур и свободные колебания в нем. Превращения энергии в колебательном контуре. Собственная частота колебаний в контуре.	317
	§ 11.2. Затухание свободных колебаний в реальном контуре. Генератор незатухающих колебаний	319
	§ 11.3. Производство электроэнергии. Переменное напряжение и переменный ток. Работа и мощность переменного тока. Действующие значения тока и напряжения.	320
	§ 11.4. Закон Ома для участка цепи в сети переменного тока. Активное, емкостное и индуктивное сопротивления. Сопротивление RLC-цепочки	323
	§ 11.5. Трансформатор. Передача электроэнергии на большие расстояния	328
	§ 11.6. Электромагнитные волны. Излучение электромагнитных волн	330
	§ 11.7. Воздействие электромагнитных волн на организм человека	333
	Основные понятия и формулы	335
	Задачи	336
	ОПТИКА	339
ГЛАВА 12. Волновая и геометрическая оптика	340	
§ 12.1. Электромагнитная природа света. Абсолютный показатель преломления среды. Дисперсия света.	340	
§ 12.2. Интерференция света, испускание света веществом. Дифракция света. Поляризация света	341	
§ 12.3. Прямолинейное распространение света. Законы отражения света. Построение изображения в плоском зеркале	344	
§ 12.4. Законы преломления света. Полное внутреннее отражение	347	
§ 12.5. Разложение белого света стеклянной призмой	350	
§ 12.6. Линза, оптическая ось. Тонкие линзы. Собирающие и рассеивающие линзы.	351	
§ 12.7. Фокус и фокусное расстояние линзы. Оптическая сила линзы. Построение изображения	352	
§ 12.8. Формула тонкой линзы. Линейное увеличение	355	
Основные понятия и формулы	356	
Задачи	358	
СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА.	365	
ГЛАВА 13. Квантовая физика	366	
§ 13.1. Элементы теории относительности	366	
§ 13.2. Тепловое излучение. Абсолютно черное тело. Закон Стефана—Больцмана. Квантовая гипотеза Планка. Термография	369	

§ 13.3. Фотоэффект и его законы. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Фотоны, давление света.	371
§ 13.4. Химическое действие света. Фотобиологические процессы.	373
§ 13.5. Опыт Резерфорда по рассеянию α -частиц. Ядерная модель атома	374
§ 13.6. Квантовые постулаты Бора. Испускание и поглощение света атомом. Люминесценция	375
§ 13.7. Взаимодействие света с веществом. Лазеры	378
§ 13.8. Радиоактивность. Альфа- и бета-частицы. Гамма-излучение. Биофизические основы действия ионизирующего излучения.	379
§ 13.9. Состав ядра атома, радиоактивные превращения. Закон радиоактивного распада. Изотопы.	381
§ 13.10. Ядерные силы. Дефект массы, энергия связи атомных ядер	384
§ 13.11. Деление тяжелых атомных ядер, цепная реакция деления. Ядерные реакторы.	385
§ 13.12. Термоядерный синтез. Проблемы термоядерной энергетики	386
Основные понятия и формулы	388
ГЛАВА 14. Эволюция Вселенной.	391
§ 14.1. Галактики. Структурные элементы Вселенной	392
§ 14.2. Наша звездная система — Галактика	393
§ 14.3. Расширяющаяся Вселенная. Теория большого взрыва. Эволюция горячей Вселенной	393
§ 14.4. Образование галактик. Эволюция звезд	396
Рекомендуемая литература	399

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Людам с давних пор были известны *постоянные магниты* — тела специальной формы (подкова, брусок, стрелка), изготовленные из *магнитного железняка* (природное ископаемое). Постоянный магнит имеет *2 полюса* (северный и южный), расположенные на его концах. Постоянные магниты притягивают железо и другие ферромагнетики, а также взаимодействуют друг с другом: противоположные полюса *притягиваются*, а одноименные — *отталкиваются*. До открытия связи между электричеством и магнетизмом постоянные магниты использовались в основном для целей навигации (стрелка компаса) и в качестве «игрушек». В настоящее время постоянные магниты используются в электроизмерительных приборах, электродвигателях, генераторах тока и т.д.

§ 9.1. МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОКОВ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

То обстоятельство, что взаимодействие полюсов постоянных магнитов сходно с взаимодействием электрических зарядов (одноименные полюса отталкиваются, а разноименные — притягиваются) заставило физиков искать связь

между электрическими и магнитными явлениями. В 1820 г. было обнаружено 2 явления:

- магнитная стрелка, установленная около проводника, отклонялась при пропускании по нему электрического тока;
- проводники, по которым протекают токи, взаимодействуют между собой (рис. 9.1): параллельные проводники притягиваются (*а*), когда токи направлены в одну сторону, и отталкиваются в противном случае (*б*). Если в одном из проводников тока нет, то взаимодействие не возникает (рис. 9.1,*б*).

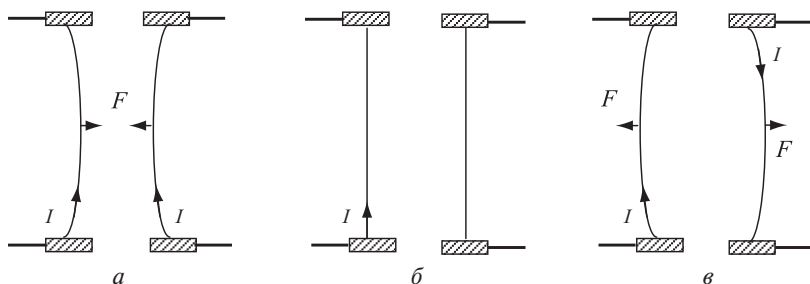


Рис. 9.1. Взаимодействие проводников с током

На основании этого французский физик Ампер предположил, что взаимодействие магнитов и проводников с током имеет общую природу. В дальнейшем это предположение подтвердилось.

Взаимодействие проводников с током, постоянных магнитов или тока с постоянным магнитом называется магнитным взаимодействием.

Магнитное взаимодействие проводников *на расстоянии* означает, что вокруг каждого из них возникает **силовое поле**, которое называют *магнитным*. Магнитное поле одного проводника действует на другой проводник с током.

Магнитное поле — особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие движущихся зарядов.

Магнитное поле материально. Оно создается *движущимися* заряженными частицами. Природными источниками магнитного поля являются движущиеся элементарные частицы, обладающие зарядом.

В макромире магнитное поле создается проводниками с током или постоянными магнитами. Исследования поля постоянных магнитов показали, что своим происхождением оно обязано особому упорядоченному вращению электронов в некоторых кристаллических веществах. При нагревании до определенной температуры упорядоченность вращения пропадает и вещество размагничивается.

Сила, с которой магнитное поле действует на проводник, зависит от направления тока. В частности,

при изменении направления тока в проводнике сила, действующая на него со стороны магнитного поля, меняет свое направление на противоположное.

Это свойство магнитного поля иллюстрирует рис. 9.1. Ток в левом проводнике остается неизменным, поэтому созданное им магнитное поле постоянно. Это поле действует на правый проводник. Когда направление тока в нем изменяется, притяжение (a) сменяется отталкиванием (b).

Зависимость направления магнитной силы от направления тока используют при исследовании магнитного поля с помощью небольшой рамки, по которой пропущен ток (рис. 9.2).

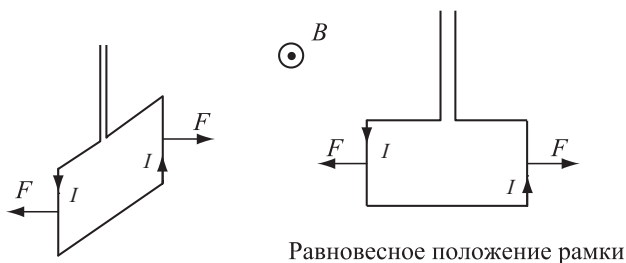


Рис. 9.2. Возникновение вращающего момента в магнитном поле

По противоположным сторонам рамки токи текут в противоположных направлениях, поэтому на них действуют *противоположные силы*. Такие силы создают *вращающий момент M* и стремятся установить рамку в равновесное положение. Величина вращающего момента зависит от ориентации плоскости рамки.

В равновесном положении силы, действующие на рамку, лежат в ее плоскости и их вращающий момент равен нулю.

Если плоскость рамки расположена перпендикулярно равновесному положению, то вращающий момент максимален — M_{\max} .

Величину M_{\max} используют при выборе характеристики магнитного поля — магнитной индукции.

Величина *магнитной индукции* равна отношению максимального вращающего момента, действующего на рамку со стороны поля, к площади рамки (S) и силе тока в ней (I):

$$B = M_{\max} / (S \cdot I).$$

За направление вектора \vec{B} принимают нормаль к равновесному положению рамки, направленную в соответствии с *правилом буравчика* (если направление вращения буравчика совпадает с направлением тока в контуре, то направление движения острия указывает направление вектора \vec{B}).

Единица магнитной индукции в СИ — *тесла* (Тл).

1 Тл — индукция такого магнитного поля, в котором максимальный вращающий момент, действующий на рамку площадью 1 м², равен 1 Н·м при силе протекающего тока $I = 1$ А.

§ 9.2. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА.

МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ. ФЕРРОМАГНЕТИЗМ

Мы помним, что напряженность кулоновского поля зависит от диэлектрической проницаемости среды, в которой оно создается. Если в вакууме заряды создают поле с напряженностью E_0 , то в диэлектрической среде напряженность поля будет меньше: $E = E_0/\epsilon$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды. Опыт показывает, что магнитная индукция B тоже зависит от свойств среды.

Магнитная индукция в веществе (B) выражается через магнитную индукцию поля в вакууме (B_0) по формуле:

$$B = \mu \cdot B_0, \quad (9.1)$$

где μ — *магнитная проницаемость* вещества. Для вакуума $\mu = 1$.

Магнитной проницаемостью вещества называется величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в этом веществе отличается по модулю от магнитной индукции в вакууме.

По способности к намагничиванию вещества делятся на три группы:

- *диамагнетики*, у которых $\mu < 1$ (вода, стекло и др.);
- *парамагнетики*, у которых $\mu > 1$ (воздух, эбонит и др.);
- *ферромагнетики*, у которых $\mu \gg 1$ (никель, железо и др.).

У диа- и парамагнетиков отличие магнитной проницаемости от единицы весьма незначительно ($\sim 0,0001$). Намагниченность этих веществ при удалении из магнитного поля *исчезает*. У ферромагнетиков магнитная проницаемость может достигать нескольких тысяч (например, у железа $\mu = 5000-10\ 000$). При удалении из магнитного поля намагниченность ферромагнетиков частично *сохраняется*. Ферромагнетики используют для изготовления постоянных магнитов.

Ферромагнетизм объясняется магнитными свойствами электронов. Установлено, что электрон обладает собственным магнитным полем. У большинства веществ эти магнитные поля взаимно компенсируются. Но в некоторых кристаллах благодаря особенностям строения электронных оболочек их атомов возникают условия для параллельной ориентации собственных магнитных полей электронов. В таких кристаллах возникают небольшие области намагниченности — *домены*, в каждой из которых поля всех электронов направлены в одну сторону.

При отсутствии *внешнего* магнитного поля магнитные поля различных *доменов* ориентированы хаотично и компенсируют друг друга. Если же ферромагнетик поместить во внешнее магнитное поле, то домены, намагниченность которых параллельна полю, будут расти за счет поглощения других доменов. Увеличивая внешнее поле, можно добиться того, что в веществе останется один домен (т.е. магнитные поля *всех* электронов направлены в сторону внешнего поля). Такое состояние называется *магнитным насыщением*.

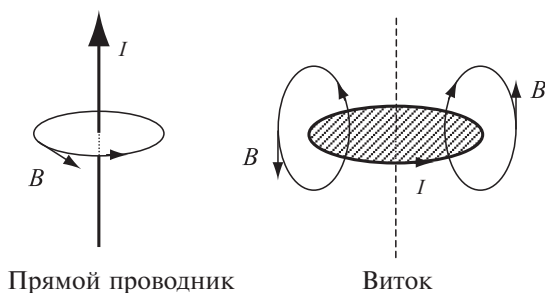
Если после того, как ферромагнетик намагничен, устранить внешнее магнитное поле, то начнется распад крупных доменов на более мелкие. Однако полного хаоса при этом не возникнет, и достигнутая ранее намагниченность частично сохранится. Это используют при изготовлении постоянных магнитов.

Значительные механические силы, действующие на ферромагнитные тела и постоянные магниты в магнитном поле, находят разнообразное применение в медицине: исправление грудной клетки у детей, удаление ферромагнитных пылинок,

опилок, стружки из глаз, магнитные заглушки для предотвращения выделений из искусственного наружного свища ободочной кишки.

§ 9.3. ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. СОЛЕНОИД

Магнитное поле графически изображается с помощью *линий магнитной индукции* (магнитные силовые линии). Касательные к силовым линиям показывают направление вектора \vec{B} в соответствующих точках. Густота линий пропорциональна модулю вектора \vec{B} . В отличие от силовых линий электростатического поля, линии магнитной индукции *замкнуты* (рис. 9.3).



Прямой проводник

Виток

Рис. 9.3. Магнитные силовые линии прямого проводника и витка с током

Силовые линии проводника с током охватывают проводник. Их направление определяют по правилу правой руки.

Если охватить проводник правой рукой, направив большой палец по направлению тока, то кончики остальных пальцев укажут направление силовой линии.

Соленоид

Индукция магнитного поля, созданного одним проводником, мала. Поэтому для создания сильных магнитных полей используют *соленоиды* — катушки с ферромагнитным сердечником, содержащие большое количество витков (рис. 9.4). В этом случае поля отдельных витков складываются, усилива-

ются сердечником и внутри соленоида возникает однородное магнитное поле с индукцией.

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot I \cdot N / l. \quad (9.2)$$

Здесь I — сила тока; N — число витков; l — длина соленоида; $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2$ — физическая константа, называемая *магнитной постоянной*.

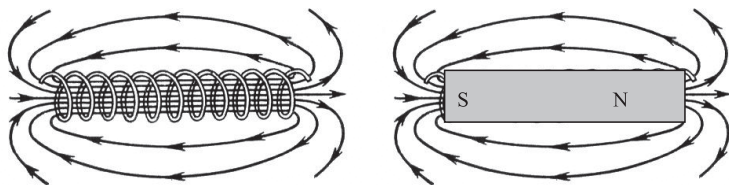


Рис. 9.4. Магнитные силовые линии соленоида и постоянного магнита

Иногда внутрь соленоида вставляют ферромагнитный сердечник. В этом случае индукция магнитного поля увеличивается пропорционально его магнитной проницаемости.

§ 9.4. СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ, ЗАКОН АМПЕРА. ПРАВИЛО ЛЕВОЙ РУКИ. СИЛА ЛОРЕНЦА

Одно из свойств магнитного поля состоит в том, что оно воздействует на проводник с током. Закон, которому подчиняется это воздействие, был экспериментально установлен французским физиком Ампером (1820).

Сила, действующая в магнитном поле на прямолинейный участок проводника с током, пропорциональна величине магнитной индукции (B), длине участка (l), силе тока (I) и синусу угла (α) между направлением тока и вектором индукции:

$$F_A = B \cdot l \cdot I \cdot \sin \alpha. \quad (9.3)$$

Сила Ампера перпендикулярна и к проводнику, и к вектору магнитной индукции. Направление на этом перпендикуляре определяется правилом левой руки (рис. 9.5).

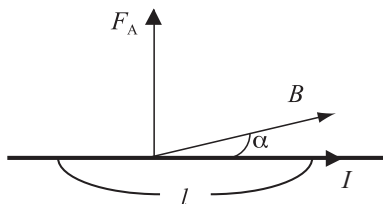


Рис. 9.5. Направление силы Ампера

Правило левой руки

Если левую руку расположить так, чтобы вектор магнитной индукции «входил в ладонь», а четыре вытянутых пальца указывали направление тока, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы Ампера.

Сила Лоренца

Сила Ампера, действующая в магнитном поле на проводник с током, складывается из сил, которые действуют на его движущиеся свободные заряды. Формулу для вычисления силы, действующей на заряд, движущийся в магнитном поле, вывел голландский физик Хендрик Лоренц. В его честь силы, действующие в магнитном поле на движущиеся заряженные частицы, называют силами Лоренца (F_L).

Величина *силы Лоренца* равна произведению магнитной индукции (B) на скорость движения заряда (v), на его величину (q) и синус угла (α) между направлением движения и вектором индукции (рис. 9.6):

$$F_L = B \cdot v \cdot q \cdot \sin \alpha. \quad (9.4)$$

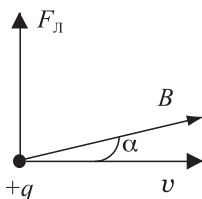


Рис. 9.6. Направление силы Лоренца

Сила Лоренца *перпендикулярна* и к вектору скорости, и к вектору магнитной индукции. Для *положительного* заряда направление силы Лоренца определяется правилом левой руки (рис. 9.6), а для отрицательного заряда имеет *обратное* направление.

Трехмерные рисунки (9.5 и 9.6) для сил Ампера и Лоренца не всегда удобны. В том случае, когда магнитное поле перпендикулярно направлению тока или направлению движения частицы ($\alpha = 90^\circ$), используют двухмерный рисунок, плоскость которого перпендикулярна направлению магнитного поля. Для обозначения вектора магнитной индукции в этом случае используют два символа, показанные на рис. 9.7.

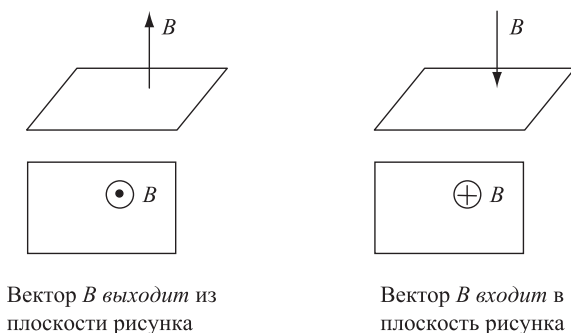


Рис. 9.7. Изображение вектора \vec{B} , перпендикулярного плоскости рисунка

Выполним плоские рисунки сил Ампера и Лоренца для случая $\alpha = 90^\circ$ (рис. 9.8).

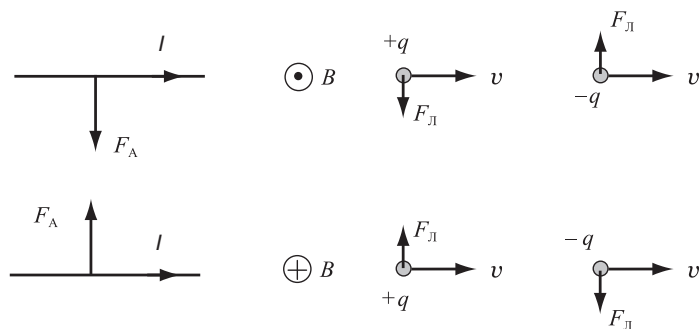


Рис. 9.8. Изображение сил Ампера и Лоренца на двухмерных рисунках

Напомним, что для определения направления силы Лоренца для *отрицательного заряда* мы сначала применяем правило левой руки, а затем *меняем* направление силы.

§ 9.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ, ОПЫТ ФАРАДЕЯ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

То обстоятельство, что электрический ток порождает магнитное поле, заставило физиков предположить, что и магнитное поле в определенных условиях может порождать в проводниках электрический ток. Такие условия были найдены в 1831 г. английским физиком Майклом Фарадеем, который обнаружил следующие явления (опыты Фарадея).

1. Возникновение тока в замкнутом контуре, который покоится в *переменном* магнитном поле.

Фарадей обнаружил возникновение электрического тока в соленоиде, внутрь которого вдвигается постоянный магнит. Ток возникает и при извлечении магнита из соленоида. В обоих случаях соленоид неподвижен, а магнитное поле изменяется.

2. Возникновение тока в замкнутом контуре, который движется в *постоянном* магнитном поле так, что изменяется число силовых линий, проходящих через контур.

Фарадей установил, что изменение числа силовых линий, проходящих через контур, является *необходимым* условием возникновения тока. Например, ток не возникает, если рамка движется параллельно линиям магнитной индукции, но возникает при вращении контура в поле.

Возникновение тока в магнитном поле было названо *электромагнитной индукцией*. Количественное исследование этого явления потребовало введения специальной величины — *магнитного потока*.

Магнитный поток

Пусть в магнитном поле с индукцией \vec{B} располагается замкнутый одновитковый контур площадью S , нормаль которого (\vec{n}) образует с вектором \vec{B} некоторый угол α (рис. 9.9).

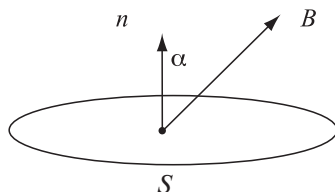


Рис. 9.9. Нахождение магнитного потока через поверхность контура

Скалярная величина, равная произведению магнитной индукции на площадь контура и на косинус угла между нормалью контура и вектором \vec{B} , называется *магнитным потоком* через поверхность контура.

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha. \quad (9.5)$$

Единица магнитного потока в СИ — *вебер*: $Вб = Тл \cdot м^2$.

1 Вб — это магнитный поток, который пронизывает перпендикулярную линиям магнитной индукции поверхность площадью $1 м^2$ при индукции магнитного поля 1 Тл.

Для контура, состоящего из нескольких витков, полный поток равен произведению потока через один виток на их количество N .

$$\Phi = N \cdot B \cdot S \cdot \cos \alpha. \quad (9.6)$$

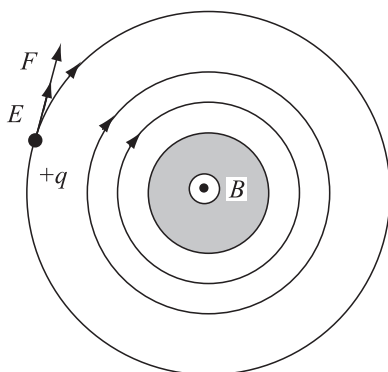
Опыт показывает, что при всяком изменении магнитного потока через замкнутый проводящий контур в нем возникает электрический ток, поэтому определение электромагнитной индукции было уточнено.

Электромагнитной индукцией называется возникновение тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока.

§ 9.6. ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ, ПРАВИЛО ЛЕНЦА. ТОКИ ФУКО

Явление электромагнитной индукции послужило толчком к созданию теории электромагнитного поля (1860–1865), которая *объединила* электрические и магнитные явления. Создателем этой теории был английский физик Джеймс Максвелл, установивший взаимосвязь *переменных* электрических и магнитных

полей. Согласно теории Максвелла, магнитное поле может создаваться не только проводниками с током, но и переменным электрическим полем. Справедлива и обратная связь: электрическое поле создается не только электрическими зарядами, но и переменным магнитным полем. Теория Максвелла объясняет явление электромагнитной индукции следующим образом. Переменное магнитное поле создает в окружающем пространстве электрическое поле с *замкнутыми силовыми линиями* — такое поле называют *вихревым*. Направление силовых линий вихревого поля соответствует *убыванию* магнитного поля соленоида (рис. 9.10). Вихревое электрическое поле и создает индукционный ток в замкнутом контуре.



На рисунке направление силовых линий соответствует *убыванию* магнитного поля соленоида.

Рис. 9.10. Силовые линии вихревого электрического поля вокруг соленоида с убывающим током. Силы, действующие на заряженные частицы со стороны вихревого электрического поля

Силы, действующие на свободные заряды со стороны вихревого поля, отличаются от кулоновских сил только одним — их работа на замкнутой траектории *не равна нулю!* Действительно, при перемещении положительного заряда $+q$ по любой из силовых линий (см. рис. 9.10) угол между вектором электрической силы ($F = qE$) и направлением движения будет все время равен нулю ($\cos \alpha = 1$). Поэтому и работа электрической силы равна $A = qEl$, где l — длина силовой линии. Силы, действующие на свободные заряды со стороны вихревого поля, и являются *сторонними силами*, создающими электродвижущую силу (ЭДС). Ее величина определяется *законом электромагнитной индукции*.

Величина ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости изменения потока:

$$\mathcal{E} = -\Delta\Phi/\Delta t, \quad (9.7)$$

где $\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока за время Δt .

Знак «−» является математическим выражением *правила Ленца*, которое определяет направление индукционного тока.

Индукционный ток имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока через контур.

Токи Фуко

Вихревое электрическое поле приводит к нагреванию проводников, находящихся в *переменном магнитном поле*. В этом случае по всему объему проводника возникают вихревые токи, протекание которых сопровождается выделением теплоты. Совокупность всех таких токов называют токами Фуко. На рис. 9.11 стрелками показаны токи Фуко, возникающие в металлическом диске.

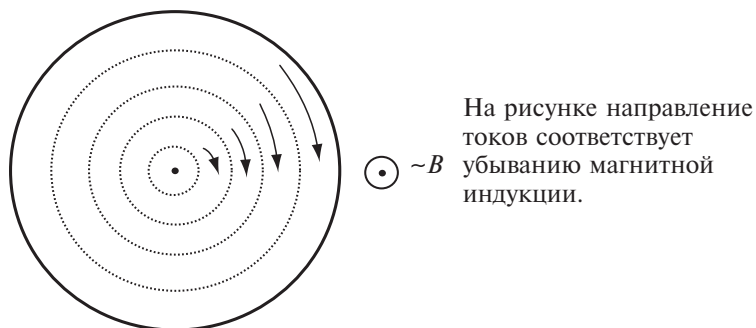


Рис. 9.11. Токи Фуко в проводящем диске, расположенном в переменном магнитном поле

В технике с токами Фуко приходится бороться (потери энергии). Однако в медицине эти токи используют в лечебных целях.

§ 9.7. ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ. ИНДУКТИВНОСТЬ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Явление электромагнитной индукции можно наблюдать и в том случае, когда *внешнее* магнитное поле отсутствует. Например, если по замкнутому контуру пропустить *переменный* ток, то он создаст переменное магнитное поле. Переменное поле, в свою очередь, создаст переменный магнитный поток через контур, и в нем возникнет ЭДС.

Возникновение электродвижущей силы в контуре, по которому протекает переменный ток, называется *самоиндукцией*.

Индукция магнитного поля, создаваемого током, прямо пропорциональна силе тока, поэтому и магнитный поток, создаваемый этим полем, прямо пропорционален силе тока.

Магнитный поток, возникающий при протекании тока по контуру или катушке, прямо пропорционален силе тока:

$$\Phi = L \cdot I. \quad (9.8)$$

Коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью контура.

Индуктивность контура численно равна магнитному потоку, создаваемому током 1 А.

Единица измерения индуктивности в СИ — *генри*: (Гн = Вб/А).

Величина индуктивности зависит от формы и размера витков, от их количества, а также от магнитной проницаемости среды.

Найдем электродвижущую силу самоиндукции \mathcal{E} . Согласно закону электромагнитной индукции, $\mathcal{E} = -\Delta\Phi/\Delta t$; в соответствии с формулой (9.8), $\Delta\Phi = L \cdot \Delta I$. Отсюда получается формула для ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E} = -L \cdot \Delta I / \Delta t. \quad (9.9)$$

Электродвижущая сила самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре.

Знак «—» означает, что ЭДС самоиндукции препятствует изменению силы тока в контуре.

Благодаря самоиндукции ток в контуре не может ни мгновенно возникнуть, ни мгновенно исчезнуть, так как и тому, и другому противодействует ЭДС самоиндукции. Поэтому при

включении тока в контуре он нарастает *постепенно*. Во время нарастания тока работа сторонних сил источника тока расходуется на создание магнитного поля. Следовательно, магнитное поле *обладает энергией*.

Энергия магнитного поля катушки пропорциональна ее индуктивности и квадрату силы тока:

$$W = L \cdot I^2 / 2. \quad (9.10)$$

§ 9.8. МАГНИТОБИОЛОГИЯ, БИОМАГНЕТИЗМ

Магнитобиология занимается изучением воздействия магнитного поля на биообъекты.

Магнитное поле оказывает воздействие на биологические системы, которые в нем находятся. Так, например, имеются сведения:

- о гибели дрозофилы в неоднородном магнитном поле;
- об угнетении роста бактерий в магнитном поле;
- о морфологических изменениях у животных и растений после пребывания в постоянном магнитном поле;
- об ориентации растений в магнитном поле;
- о влиянии магнитного поля на нервную систему и изменении характеристик крови;
- об эффективности процессов регенерации при действии низкочастотного магнитного поля.

Первичными процессами во всех случаях являются физические или физико-химические процессы. Такими процессами могут быть: ориентация молекул; изменение концентрации молекул или ионов в неоднородном магнитном поле; силовое воздействие (сила Лоренца) на ионы и др.

В настоящее время разработан комплекс лечебных и диагностических процедур с использованием магнитного поля.

Постоянная магнитотерапия — лечебное использование нетепловых эффектов постоянного магнитного поля.

Постоянные магнитные поля с индукцией 1–50 мТл вызывают перестройку жидкокристаллических структур биологических мембран, что существенно изменяет проницаемость липидного бислоя и приводит к усилению метаболической и ферментативной активности клеток. В цитоплазме такие поля индуцируют фазовые гель-золь переходы. Воздействие постоянного магнит-

ного поля на кровь и лимфу может существенно изменять их вязкость и другие физико-химические свойства. Вместе с тем следует указать на то, что физическая природа воздействия постоянного магнитного поля на биологические объекты изучена слабо.

В настоящее время с лечебной целью используют устройства нескольких типов.

- Магнитоэласты, изготовленные из смеси полимерного вещества с порошкообразным ферромагнитным наполнителем. Их магнитное поле имеет индукцию 8–16 мТл. Используются для изготовления всевозможных радикулитных поясов.
- Магниты кольцевые, пластинчатые, дисковые. Магнитная индукция 60–130 мТл.
- Микромагниты — намагниченные иглы, шарики, клипсы (для магнитопунктуры). Магнитная индукция 60–100 мТл.
- Пластинчатые магниты используют в виде браслетов, носимых на запястье пациента. Магнитная индукция 20–70 мТл.

Импульсная магнитотерапия — лечебное применение импульсного магнитного поля при невысокой частоте следования импульсов (не более 1000 имп/с). Возникающие при этом токи Фуко способны вызвать возбуждение волокон периферических нервов и ритмические сокращения миофибрилл скелетной мускулатуры, гладких мышц сосудов и внутренних органов. Вихревые токи низкой частоты способны блокировать афферентную импульсацию из болевого очага (купирование болевого синдрома).

Высокочастотная магнитотерапия — лечебное применение магнитного поля высокой частоты (выше 10 МГц). Здесь используется тепловое действие токов Фуко (устаревшее название этого метода — *индуктотермия*). В отличие от методов лечения высокочастотными токами, основное тепловое воздействие в данном случае оказывается на ткани с малым удельным сопротивлением. Поэтому сильнее нагреваются ткани, богатые сосудами, например мышцы. В меньшей степени нагреваются такие ткани, как жир.

Биомагнетизм занимается проблемами, которые связаны с магнитными свойствами и магнитными полями, создаваемыми биологическими объектами.

Магнитное поле человека создается токами, генерируемыми клетками сердца и коры головного мозга. Оно очень мало: индукция магнитного поля составляет для сердца — 10^{-11} , для мозга 10^{-13} Тл (ср. с магнитным полем Земли $\sim 10^{-5}$ Тл). Для измерения магнитного поля тела человека используют специальный магнитометр (сокращенное его название СКВИД), который регистрирует сверхмалые магнитные поля до 10^{-18} Тл. Метод основан на измерении не самого магнитного поля тела, а его изменения в пространстве. Ниже, в табл. 9.1, представлены характеристики магнитных полей, создаваемых различными источниками.

Таблица 9.1. Диапазоны измеренных магнитных полей

Источник	В, Тл
Токи альфа-ритма головного мозга	10^{-15}
Токи, управляющие сокращениями сердца	10^{-14}
Типичный телевизионный сигнал	10^{-11}
Свет 100-ваттной лампы на расстоянии 3 м	10^{-8}
У поверхности Земли	$5 \cdot 10^{-5}$
Между полюсами школьного постоянного магнита	$2 \cdot 10^{-2}$
На атомном ядре, создаваемое валентными электронами	10^2
Поверхность нейтронной звезды	10^8

§ 9.9. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ И ЕГО РОЛЬ В ЗАЩИТЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИЗНИ

Земля обладает собственным магнитным полем, происхождение которого достоверно неизвестно. Наличие этого поля легко обнаруживается с помощью компаса. Магнитные полюса Земли расположены вблизи ее географических полюсов. Такое совпадение позволяет предположить, что возникновение магнитного поля каким-то образом связано с вращением Земли вокруг оси. Обратите внимание на то, что вблизи «северного географического полюса» расположен «южный магнитный полюс» Земли. Такое кажущееся несоответствие связано с происхождением названия «северный магнитный полюс». Географические понятия «север» и «юг» являются более древними, поэтому «северным» называли тот конец магнитной стрелки, который указывает на географический «север» (и покрасили-то его в синий цвет —

символ холода). Но ведь притягиваются *противоположные полюса*. Значит, на «севере» находится *южный* магнитный полюс.

Величина магнитной индукции Земли (B_3) в среднем равна $5 \cdot 10^{-5}$ Тл (у полюсов — побольше, в районе экватора — поменьше). Много это или мало? — Смотря с чем сравнивать. Магниты, используемые в лабораториях, создают магнитное поле 10^{-2} Тл (в 200 раз сильнее). Для человека при длительном воздействии опасно поле выше 0,2 Тл. Сами по себе эти числа ни о чем не говорят, потому что основная роль магнитного поля Земли — защита ее поверхности от космической радиации и вызываемых ею массовых мутаций. Справляется ли оно с этой ролью? — Давайте посчитаем. Рассмотрим упрощенный случай — частица влетает в магнитное поле, имеющее резкую границу (до этой границы поля нет). После пересечения границы частица начнет двигаться по дуге окружности. При этом сила Лоренца является центростремительной силой (рис. 9.12).

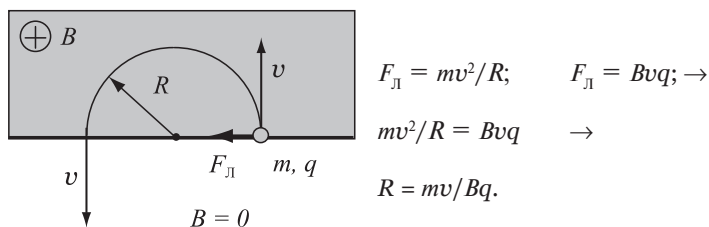


Рис. 9.12. Магнитное поле «отбрасывает» заряженные частицы

Описав полуокружность, частица вылетит в обратном направлении. Максимальная глубина ее проникновения в магнитное поле равна радиусу окружности:

$$R = mv/Bq, \tag{9.11}$$

где m , q — масса и заряд частицы; v — скорость ее движения; B — величина магнитной индукции.

Основным источником космического излучения является Солнце, состоящее из ядер водорода, ядер гелия и электронов. Оценим глубину проникновения ядра гелия (α -частица) в магнитное поле Земли. Примем следующие значения:

$B_3 = 5 \cdot 10^{-5}$ Тл; $m = 6,6 \cdot 10^{-27}$ кг; $q = 2e = 3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл; $v = 10^6$ м/с (1000 км/с).

Подставив эти значения в формулу (9.11), получим $R = 400$ м. Таким образом, магнитное поле Земли задерживает заряженные частицы еще в верхних слоях атмосферы.

Мы рассмотрели простейший случай, когда скорость частицы перпендикулярна направлению *однородного* поля. Если поле неоднородно, а скорость направлена под некоторым углом к линиям магнитной индукции, то частица будет двигаться по спирали, вращаясь вокруг силовой линии и одновременно продвигаясь вдоль нее. Силовые линии сгущаются у полюсов, поэтому магнитное поле отводит потоки заряженных частиц в верхние слои атмосферы полярных областей, где они интенсивно тормозятся. Там наблюдаются полярные сияния, вызванные тормозным ускорением заряженных частиц.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ФОРМУЛЫ

Магнитное взаимодействие	Так называют взаимодействие проводников с током, постоянных магнитов или тока с постоянным магнитом
Магнитное поле	Магнитное поле — это особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие движущихся электрических зарядов
Магнитная индукция (B)	<p>Величина, равная отношению максимального вращающего момента, действующего на рамку со стороны поля, к площади рамки (S) и силе тока в ней (I):</p> $B = M_{\max} / (S \cdot I).$ <p>Единица измерения магнитной индукции — <i>тесла</i> (Тл)</p>
Магнитная проницаемость вещества (μ)	<p>Это характеристика вещества, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в этом веществе (B) отличается от магнитной индукции в вакууме (B_0):</p> $B = \mu \cdot B_0$
Диамагнетики	$\mu < 1$, намагниченность не сохраняется
Парамагнетики	$\mu > 1$, намагниченность не сохраняется
Ферромагнетики	$\mu \gg 1$, намагниченность сохраняется
Линии магнитной индукции	<p>Линии, касательные к которым указывают направление магнитного поля в соответствующих точках.</p> <p>Линии магнитной индукции применяют для графического изображения магнитного поля</p>

Правило правой руки для определения направления <i>линии магнитной индукции</i> проводника с током	Если охватить проводник правой рукой, направив большой палец по направлению тока, то кончики остальных пальцев укажут направление силовой линии
Соленоид	Это катушка с большим количеством витков. Используется для создания сильного магнитного поля
Формула для расчета индукции магнитного поля соленоида	$B = \mu_0 \mu \cdot I \cdot N / l,$ I — сила тока; N — число витков; l — длина соленоида; μ — магнитная проницаемость сердечника; $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Н/А ² — физическая константа, называемая <i>магнитной постоянной</i>
Закон Ампера для силы, действующей на проводник с током в магнитном поле	Сила, действующая в магнитном поле на прямолинейный участок проводника с током, пропорциональна величине магнитной индукции (B), длине участка (l), силе тока (I) и синусу угла между направлением тока и вектором индукции: $F_A = B \cdot l \cdot I \cdot \sin \alpha$
Правило левой руки для определения направления силы Ампера	Если левую руку расположить так, что вектор магнитной индукции «входит в ладонь», а четыре вытянутых пальца указывают направление тока, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы Ампера
Сила Лоренца, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле	Величина <i>силы Лоренца</i> равна произведению магнитной индукции (B) на скорость движения заряда (v), на его величину (q) и синус угла между направлением движения и вектором индукции: $F_L = B \cdot v \cdot q \cdot \sin \alpha$
Явления электромагнитной индукции	<i>Электромагнитной индукцией</i> называется возникновение тока в замкнутом контуре при изменении магнитного потока
Магнитный поток	Скалярная величина, равная произведению магнитной индукции (B) на площадь контура (S) и на косинус угла между нормалью контура и вектором \vec{B} : $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha.$ Единица магнитного потока в СИ — <i>вебер</i> : $B\Phi = \text{Тл} \cdot \text{м}^2$
Магнитный поток через катушку	$\Phi = N \cdot B \cdot S \cdot \cos \alpha,$ N — число витков
Вихревое электрическое поле	Это электрическое поле с <i>замкнутыми силовыми линиями</i> . Такое поле создается переменным магнитным полем

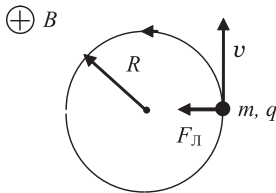
Закон электромагнитной индукции	<p>Величина \mathcal{E} индукции прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока:</p> $\mathcal{E} = -\Delta\Phi/\Delta t,$ <p>$\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока за время Δt</p>
Правило Ленца для определения направления индукционного тока	Индукционный ток имеет такое направление, при котором магнитное поле противодействует изменению магнитного потока через контур
Токи Фуко	Вихревые токи, возникающие по всему объему проводника в переменном магнитном поле. Токи Фуко возникают под действием вихревого электрического поля
Самоиндукция	Возникновение электродвижущей силы в контуре, по которому протекает переменный ток
Магнитный поток, порождаемый током	<p>Магнитный поток, возникающий при протекании тока по контуру или катушке, прямо пропорционален силе тока:</p> $\Phi = L \cdot I$
Индуктивность контура (L)	<p>Это характеристика контура, численно равная магнитному потоку, создаваемому током 1 А. Величина индуктивности зависит от формы и размера витков, от их количества, а также от магнитной проницаемости среды.</p> <p>Единица измерения индуктивности в СИ— <i>генри</i>: $\text{Гн} = \text{Вб}/\text{А}$</p>
ЭДС самоиндукции	<p>Электродвижущая сила самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре:</p> $\mathcal{E} = -L \cdot \Delta I / \Delta t,$ <p>где ΔI — изменение силы тока за время Δt</p>
Расчет энергии магнитного поля катушки	<p>Энергия магнитного поля катушки пропорциональна ее <i>индуктивности</i> и квадрату силы тока:</p> $W = L \cdot I^2 / 2$
Радиус окружности, которую описывает в магнитном поле частица, движущаяся перпендикулярно силовым линиям	$R = mv/Bq,$ <p>где m, q — масса и заряд частицы; v — скорость ее движения; B — величина магнитной индукции</p>

ЗАДАЧИ

Магнетизм.

1. Силы Лоренца и Ампера

Пример 1. Частица, находящаяся в однородном магнитном поле, начинает двигаться так, что ее скорость *перпендикулярна* линиям магнитной индукции. В этом случае она движется в одной плоскости *по окружности*. Сила Лоренца играет роль центростремительной силы:



$$F_L = mv^2/R; F_L = Bvq; \rightarrow$$

$$mv^2/R = Bvq \rightarrow$$

$$R = mv/Bq.$$

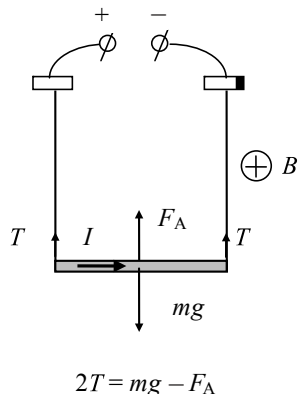
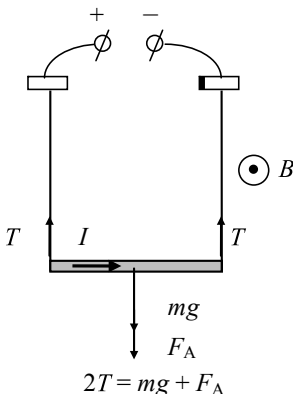
$$T = 2\pi R/v = 2\pi m/Bq.$$

Таким образом, частица движется по окружности. Радиус (R) и период вращения (T) определяются формулами

$$R = mv/Bq; T = 2\pi m/Bq.$$

Направления вращения у положительной и отрицательной частиц *противоположны*.

Пример 2. Проводник подвешен горизонтально на тонких проволочках, по которым к нему подводится ток. Магнитное поле направлено горизонтально и перпендикулярно проводнику. Что происходит при включении тока? — Сила Ампера в данном случае направлена вертикально вверх или вертикально вниз. Натяжение проволочек будет соответственно уменьшаться или возрастать.



2. Электромагнитная индукция (ЭМИ)

Задачи по этой теме решаются по жесткой схеме. Сначала записывается закон ЭМИ для модуля индукции (знак «минус» перед \mathcal{E} в задачах не пишется):

$$\mathcal{E} = |\Delta\Phi|/\Delta t.$$

Если в задаче фигурирует индукционный ток I , то добавляют закон Ома:

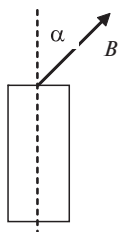
$$I = \mathcal{E}/R = |\Delta\Phi|/\Delta t R.$$

После этого рисуют начальное и конечное состояния контура, находят по формуле (9.6) Φ_1 и Φ_2 , а затем $|\Delta\Phi| = (\text{большее значение} - \text{меньшее значение})$.

Иногда начальное и конечное состояния контура не указывают, а сообщают о непрерывном изменении чего-либо.

Пример 3. Катушка с площадью сечения S содержит N витков. Ось катушки составляет с направлением магнитного поля угол α . Магнитное поле возрастает со скоростью 3 Тл/с. Найти ЭДС.

Здесь мы делаем один рисунок и записываем формулу потока индукции:

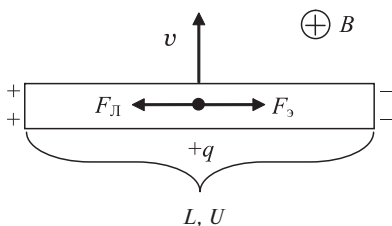


$$\Phi = NBS \cdot \cos \alpha \rightarrow \Delta\Phi = N \cdot \Delta B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

$$\mathcal{E} = \Delta\Phi/\Delta t = N \cdot \Delta B \cdot S \cdot \cos \alpha / \Delta t.$$

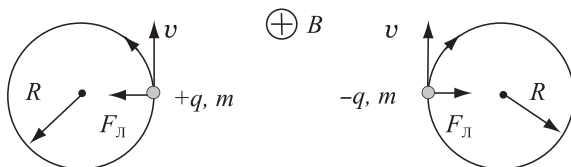
При вычислениях берем $\Delta B = 3$ Тл, а $\Delta t = 1$ с.

Пример 4. Проводник движется перпендикулярно линиям магнитной индукции, как показано на рисунке. Определить разность потенциалов, возникающую между его концами.



Свободные заряды (q) внутри проводника под действием силы Лоренца $F_{\text{Л}} = Bvq$ будут смещаться влево. На концах проводника возникнут заряды, которые создадут электрическое поле. Между концами проводника возникнет напряжение U . Напряженность поля $E = U/L$ (формула 7.9). Электрическое поле создаст электрическую силу $F_{\text{э}} = Eq = Uq/L$. Равновесие наступит, когда электрическая сила уравнивает силу Лоренца: $Uq/L = Bvq \rightarrow U = BvL$.

Задача 9.1. Заряженная частица движется в однородном магнитном поле перпендикулярно силовым линиям. Указать направление для положительной и отрицательной частиц. Определить радиус окружности и частоту вращения.



Решение

См. пример 1.

Ответ: $R = mv/qB$; $\nu = Bq/2\pi m$.

Задача 9.2. Между рельсами включен вольтметр. Над ним с постоянной скоростью $v = 20$ м/с проходит поезд. Каковы будут показания вольтметра при приближении поезда? Вертикальная составляющая магнитного поля Земли $B = 5 \cdot 10^{-5}$ Тл. Ширина колеи $L = 1,2$ м.

Решение

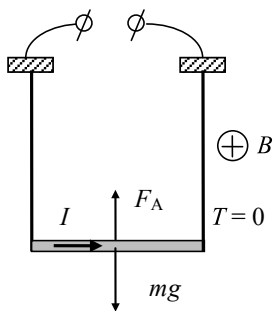
$U = BvL = 1,2 \cdot 10^{-3}$ В (см. пример 4).

Ответ: $U = 1,2 \cdot 10^{-3}$ В.

Задача 9.3. В горизонтальном магнитном поле $B = 0,01$ Тл находится прямолинейный проводник, расположенный горизонтально и перпендикулярно магнитному полю. Какой ток должен идти по проводнику, чтобы уничтожить натяжение в поддерживающих его гибких проводах? Масса проводника $m = 40$ г, длина проводника $L = 0,8$ м.

Решение

См. пример 2.



$$F_A = BLI.$$

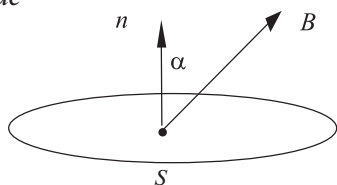
$$F_A = mg \rightarrow BLI = mg$$

$$I = mg/BL = 50 \text{ A.}$$

Ответ: $I = 50 \text{ A.}$

Задача 9.4. В однородном магнитном поле расположен виток, площадь которого $S = 50 \text{ см}^2$. Перпендикуляр к плоскости витка составляет с направлением магнитного поля угол $\alpha = 60^\circ$. Индукция магнитного поля $B = 0,2 \text{ Тл}$. Найти среднее значение ЭДС индукции \mathcal{E} , возникающей в витке при выключении поля в течение времени $\Delta t = 0,02 \text{ с}$.

Решение



$$\Phi_1 = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

$$\Phi_2 = 0$$

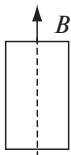
$$|\Delta\Phi| = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

$$\mathcal{E} = |\Delta\Phi|/\Delta t = B \cdot S \cdot \cos \alpha / \Delta t = 0,025 \text{ В} = 25 \text{ мВ.}$$

Ответ: $\mathcal{E} = 25 \text{ мВ.}$

Задача 9.5. Магнитное поле, в котором находится катушка, направлено по ее оси и равномерно возрастает в течение $\Delta t = 0,01 \text{ с}$. При этом в катушке возникает ЭДС $\mathcal{E} = 200 \text{ В}$. Определить модуль изменения магнитного потока $|\Delta\Phi_0|$ через один виток катушки, если она имеет $n = 2000$ витков.

Решение



См. пример 3.

$$\mathcal{E} = |\Delta\Phi|/\Delta t = N \cdot |\Delta\Phi_0|/\Delta t \rightarrow |\Delta\Phi_0| = \mathcal{E} \cdot \Delta t / N.$$

$$|\Delta\Phi_0| = 10^{-3} \text{ Вб} = 1 \text{ мВб.}$$

Ответ: $|\Delta\Phi_0| = 10^{-3} \text{ Вб} = 1 \text{ мВб.}$

Задача 9.6. В однородном магнитном поле находится плоский виток площадью $S = 10 \text{ см}^2$, расположенный перпендикулярно силовым линиям. Сопротивление витка $R = 0,01 \text{ Ом}$. Какой ток возникнет в витке, если поле будет нарастать со скоростью 2 Тл/с ?

Решение

Необходим перевод $S = 10 \text{ см}^2 = 10 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Кроме того, преобразуем скорость нарастания поля в стандартные символы: $\Delta B = 2 \text{ Тл}$; $\Delta t = 1 \text{ с}$.

$$\mathcal{E} = |\Delta\Phi| / \Delta t; \quad I = \mathcal{E} / R = |\Delta\Phi| / \Delta t \cdot R.$$

$$\Phi = BS \rightarrow \Delta\Phi = \Delta B \cdot S \rightarrow I = \Delta B \cdot S / \Delta t \cdot R = 0,2 \text{ А}.$$

Ответ: $I = 0,2 \text{ А}$.

Задача 9.7. Чему равна индуктивность катушки, если при изменении силы тока от 12 до 4 А в течение $\Delta t = 0,2 \text{ с}$ в ней возникает ЭДС самоиндукции $\mathcal{E} = 20 \text{ В}$?

Решение

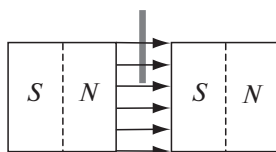
Запишем закон самоиндукции (9.9): $\mathcal{E} = L \cdot \Delta I / \Delta t$ (знак «минус» в задачах не пишут).

Отсюда найдем индуктивность $L = \mathcal{E} \cdot \Delta t / \Delta I = 20 \cdot 0,2 / 8 = 0,5 \text{ Гн}$.

Ответ: $L = 0,5 \text{ Гн}$.

Задача 9.8. Металлический диск падает в щель между двумя полюсами магнита. Сравнить набранную им скорость со скоростью, которую он приобрел бы на таком же пути при отсутствии магнитного поля.

Решение



При входе диска в щель и при выходе из нее будет изменяться магнитный поток и в диске возникнут токи Фуко, нагревающие его. По закону сохранения энергии теплота выделяется за счет убывания механической энергии. Поэтому скорость, набранная диском, падающим между полюсами магнита, будет меньше.

Ответ: скорость, набранная в магнитном поле, будет меньше.