

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

ФИЗИКА. ЧАСТЬ 1

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

**Институт управления производственными и инновационными
программами**

Специальность:

080502.65 – экономика и управление на предприятии машиностроения и
автомобильного транспорта

Санкт-Петербург
Издательство СЗТУ
2009

Утверждено редакционно-издательским советом университета

УДК 001: 5:1М

Физика. Часть 1: учебно-методический комплекс / сост. В.П. Дзекановская, СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009. – 179 с.

Учебно-методический комплекс разработан в соответствии с государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования.

В дисциплине “Физика. Часть 1” рассматриваются основы механики - кинематика и динамика поступательного и вращательного движения, законы сохранения импульса, энергии, момента импульса; законы молекулярной физики и термодинамики; законы электростатики, постоянного тока и магнетизма.

Рассмотрено на заседании кафедры физики 18.05.2009 г., одобрено методической комиссией факультета общепрофессиональной подготовки 19.05.2009 г.

Рецензенты: кафедра физики СЗТУ (зав. кафедрой А.Б. Федорцов, д-р физ.-мат. наук, проф.), И.А. Пресс, канд. хим. наук, профессор кафедры химии факультета общепрофессиональной подготовки.

Составитель: Дзекановская В.П., канд. физ.-мат.наук, доц.

© Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2009

© Дзекановская В.П., 2009

1. ИНФОРМАЦИЯ О ДИСЦИПЛИНЕ

1.1. Предисловие

Дисциплина “Физика” для студентов специальности 080502.65 состоит из двух частей (модулей).

Модуль дисциплины “Физика. Часть 1” включает в себя следующие разделы: физические основы механики; молекулярная физика и термодинамика; электричество и магнетизм.

Целью изучения дисциплины является создание фундаментальной базы для теоретической подготовки специалиста, без которой невозможна его успешная деятельность в любой области современной техники; формирование у студентов представлений о современной физической картине мира.

Задачи изучения дисциплины – подготовка квалифицированного специалиста по конкретной специальности или направлению. Для решения этой задачи необходимо формирование у студентов базы знаний, умений и навыков для изучения специальных дисциплин. Определяющая задача обучения – формирование необходимых методических навыков. В результате изучения дисциплины студент должен овладеть основами знаний по дисциплине, формируемыми на нескольких уровнях:

Иметь представление:

- о фундаментальном единстве естественных наук;
- о дискретности и непрерывности в природе;
- о соотношении порядка и беспорядка в природе, упорядоченности строения объектов, переходах в неупорядоченное состояние и наоборот;
- о динамических и статистических закономерностях в природе;
- о вероятности как объективной характеристике природных систем;
- о принципах симметрии и законах сохранения;
- о новейших открытиях в области физики, перспективах их использования для создания технических устройств.

Знать:

фундаментальные понятия, законы и теории современной и классической физики, знать их основные применения в современной технике и технологиях.

Уметь:

пользоваться современной научной аппаратурой для проведения измерений физических величин; оценивать погрешности измерений; использовать навыки физического моделирования для решения прикладных задач по будущей специальности.

Владеть:

понятиями физики, которые лежат в основе всего естествознания и являются основой для создания и эксплуатации техники. Дисциплина “Физика” базируется на системе прочно вошедших в науку законов и положений физики. Эта система представлена в виде типовых взаимосвязанных разделов физики (“Физические основы механики”, “Молекулярная физика и термодинамика”, “Электричество и магнетизм”, “Колебания и волны”, “Квантовая физика”, “Оптика”, “Атомная и ядерная физика”), позволяющих наиболее логично связать их с основными направлениями развития техники.

Место дисциплины в учебном процессе

Дисциплина “Физика” совместно с дисциплинами “Математика”, “Информатика” играет роль фундаментальной базы для изучения всех инженерных и специальных дисциплин, обеспечивающей единство фундаментальности и профессиональной направленности обучения. В процессе изучения физики у студентов вырабатываются методические навыки учебной работы, развивается логическое мышление и творческие способности.

В рамках изучения дисциплины студенты заочной и очно-заочной форм обучения выполняют лабораторные работы и контрольные работы № 1 и № 2.

Рабочая программа по дисциплине составлена в соответствии с государственными образовательными стандартами и представлена в разделе 2 “Рабочие учебные материалы”.

Тематический план дисциплины, содержащий информацию о видах отчетности по темам, приведен в разделе 2 “Рабочие учебные материалы” в виде таблицы.

Библиографический список, общий для всей дисциплины, представлен в разделе 3 “Информационные ресурсы дисциплины”. Дополнительная литература приведена в соответствующих разделах дисциплины.

1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы

1.2.1. Содержание дисциплины по ГОС

Научный метод познания. Фундаментальные закономерности современного естествознания как теоретический фундамент новых наукоемких технологий. Роль физики в социальном и экономическом развитии общества. Основные направления развития научно-технического прогресса в отрасли. Основы механики: основные характеристики и закономерности кинематики и динамики твердого тела; законы сохранения механики; основные характеристики и закономерности гидроаэромеханики. Молекулярная физика и термодинамика: статистический и термодинамический методы исследования; основы молекулярно-кинетической теории; классическая и квантовая статистика; основные характеристики и закономерности агрегатных состояний и фазовых переходов; явления переноса; законы термодинамики; термодинамические функции состояния; равновесные состояния и процессы; неравновесные состояния и процессы; синергетика и экономика. Электричество и магнетизм: основные характеристики и закономерности электростатики; вещество в электрическом поле; основные характеристики и закономерности магнитостатики; вещество в магнитном поле; явление электромагнитной индукции; электромагнитные волны. Принцип относительности в электродинамике.

1.2.2. Объем дисциплины и виды учебной работы

1.2.2. Объем дисциплины и виды учебной работы

Виды учебной работы	Всего часов		
	Форма обучения		
	очная	очно- заочная	заочная
Общая трудоемкость дисциплины	100		
Работа под руководством преподавателя (включая ДОТ)	60	60	60
В том числе аудиторные занятия:			
лекции	24	16	6
практические занятия	10	—	—
лабораторные работы	16	8	8
Количество часов занятий использованием ДОТ	10	36	46
Самостоятельная работа студента	40	40	40
Промежуточный контроль (тесты) количество	3	5	5
в том числе контрольная работ	-	2	2
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	Экзамен	Экзамен	Экзамен

Перечень видов практических занятий и контроля:

- три теста (по 1 на каждый раздел);
- контрольные работы № 1 и № 2 для очно-заочной и заочной форм обучения;
- лабораторные работы – 12 часов для очной формы обучения, 8 часов для очно-заочной и 6 для заочной форм обучения;
- экзамен.

2. РАБОЧИЕ УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Рабочая программа (100 час.)

Введение

Научный метод познания. Фундаментальные закономерности современного естествознания как теоретический фундамент новых наукоемких технологий. Роль физики в социальном и экономическом развитии общества. Основные направления развития научно-технического прогресса в отрасли.

Методы физического исследования: опыт, гипотеза, эксперимент, теория, физические величины и их измерение. Система единиц физических величин. Мировые постоянные. Размерности физических величин. Виды измерений и типы погрешностей. Основы обработки результатов измерений.

Раздел 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ (36 час.)

1.1. Элементы кинематики материальной точки и вращательного движения твердого тела (10 час.)

[1], с. 6...14

Механическое движение. Предмет кинематики. Система отсчета. Материальная точка. Траектория. Путь и перемещение. Скорость и ускорение как производные радиус-вектора по времени. Поступательное движение твердого тела. Вращательное движение твердого тела. Угол поворота. Угловая скорость и угловое ускорение. Связь между угловыми и линейными характеристиками движения.

1. 2. Динамика материальной точки и системы материальных точек (10 час.)

[1], с. 14...21

Понятие состояния в классической механике. Первый закон Ньютона – закон инерции. Инерциальные системы отсчета. Сила и масса. Импульс тела. Второй и третий законы Ньютона. Силы в природе. Внешние и внутренние силы. Замкнутые механические системы. Закон сохранения импульса.

Энергия как универсальная мера различных форм движения и взаимодействия. Механическая энергия и работа. Кинетическая энергия. Потенциальная энергия. Консервативные силы и потенциальные поля. Связь между силой и потенциальной энергией. Потенциальная энергия упругих деформаций и поля тяготения. Закон сохранения полной механической энергии. Соударение тел.

1.3. Элементы динамики вращательного движения твердого тела

(10 час.)

[1], с. 34...41

Понятие абсолютно твердого тела. Момент силы. Момент импульса при вращении вокруг неподвижной оси. Основное уравнение динамики вращательного движения. Момент инерции материальной точки и твердого тела. Моменты инерции некоторых тел. Физический смысл момента инерции. Закон сохранения момента импульса. Кинетическая энергия вращающегося и катящегося тела. Работа внешних сил при вращении.

1.4. Элементы механики жидкости и газа (6 час.)

[1], с. 56...66

Основные характеристики и закономерности гидроаэромеханики. Давление в жидкостях и газах. Уравнение неразрывности. Уравнение Бернулли и следствия из него. Вязкость. Ламинарное и турбулентное течение.

Раздел 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА (24 час)

2.1. Кинетические явления и теория идеальных газов (5 час)

[1], с. 81...88

Основы молекулярно-кинетической теории (МКТ). Состояние системы. Параметры состояния. Равновесные состояния и процессы. Их графическое изображение. Опытные законы идеальных газов. Уравнение Менделеева-Клапейрона.

Основное уравнение МКТ идеальных газов. Число степеней свободы молекул. Закон Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул.

Молекулярно-кинетическое толкование температуры. Связь давления, концентрации и температуры. Внутренняя энергия идеального газа.

2.2. Основы классической статистической физики (6 час.)

[1], с. 88...94

Статистический и термодинамический методы исследования. Скорости молекул. Понятие о функции распределения. Закон Максвелла для распределения молекул идеального газа по скоростям. Наиболее вероятная, средняя арифметическая и средняя квадратичная скорости молекул. Распределение Больцмана.

2.3. Явления переноса в неравновесных состояниях (4 час.)

[1], с.95...99

Неравновесные состояния и процессы; синергетика и экономика. Тепловое движение и связанный с ним перенос массы, импульса и энергии. Обратимые и необратимые процессы. Опытные законы диффузии, теплопроводности и внутреннего трения, их молекулярно-кинетическая теория.

2.4. Основы термодинамики (7 час.)

[1], с. 101...119

Механическая работа и теплота. Работа, совершаемая газом при изменении его объема. Первый закон термодинамики. Применение первого закона термодинамики к изопроцессам. Адиабатический процесс. Теплємкость идеального газа. Термодинамические функции состояния. Второй закон термодинамики. Коэффициент полезного действия идеального теплового двигателя.

2.5. Реальные газы и жидкости (2 час.)

[1], с. 119...125, 128...130, 141...146

Межмолекулярные взаимодействия и уравнение Ван-дер-Ваальса. Фазовые равновесия и фазовые переходы. Фазовые переходы первого рода. Микроструктура жидкого состояния.

Раздел 3 . ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ (40 час)

3.1. Электрическое поле в вакууме (6 час)

[1], с. 148...164

Электрические заряды. Сила взаимодействия точечных зарядов в вакууме и веществе. Диэлектрическая проницаемость вещества. Закон Кулона. Основные характеристики электростатического поля. Напряженность электрического поля. Графическое изображение электрического поля. Принцип суперпозиции электрических полей. Потенциал электростатического поля. Связь между напряженностью и потенциалом. Поток вектора электрического смещения. Теорема Остроградского-Гаусса для вектора электрического смещения. Применение теоремы для расчета полей.

3.2. Электрическое поле в диэлектриках (4 час)

[1], с. 152...154, 164...171

Вещество в электрическом поле. Типы диэлектриков. Поляризация диэлектриков. Связь векторов электрического смещения и напряженности электрического поля. Сегнетоэлектрики. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект и их применение.

3.3. Проводники в электростатическом поле (4 час.)

[1], с. 171...177

Носители тока в проводниках. Их распределение по заряженному проводнику. Напряженность и потенциал электростатического поля в проводнике и на его поверхности. Электростатическая защита (экранирование). Емкость уединенного проводника. Конденсаторы. Соединение конденсаторов в батареи. Энергия электростатического поля и объемная плотность энергии.

3.4. Стационарные токи (6 час.)

[1], с.180...194, 197...203

Постоянный электрический ток, его характеристики и условия существования. Сторонние силы. Электродвижущая сила и напряжение. Удельная проводимость и удельное сопротивление. Сопротивление проводников, его зависи-

мость от температуры. Закон Ома в интегральной форме для однородного участка и для замкнутой цепи. Работа и мощность электрического тока.

3.5. Магнитное поле в вакууме и в веществе (10 час.)

[1], с. 204...223, 236...247

Магнитное поле. Вектор магнитной индукции. Магнитная проницаемость вещества. Вектор напряженности магнитного поля. Закон Био-Савара-Лапласа. Применение этого закона к расчету магнитного поля отрезка прямого провода.

Принцип суперпозиции магнитных полей. Вихревой характер магнитного поля. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции (закон полного тока). Сила Ампера. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Эффект Холла. Вещество в магнитном поле. Намагниченность. Типы магнетиков. Ферромагнетизм. Применение ферромагнетиков.

3.6. Электромагнитная индукция (6 час.)

[1], с. 223...236

Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Правило Ленца. Преобразование механической работы в электрическую энергию. Переменная ЭДС и ее амплитуда. Явление самоиндукции. Индуктивность. Явление взаимной индукции. Принцип действия трансформаторов. Энергия магнитного поля. Объемная плотность энергии.

3.7. Уравнения Максвелла. Заключение (4 час)

[1], с. 247...255

Вихревое электрическое поле. Ток проводимости и ток смещения. Система уравнений Максвелла в интегральной форме. Электромагнитное поле. Принцип относительности в электродинамике.

Заключение

Взаимосвязь явлений различной физической природы. Примеры практического применения изученных законов в различных отраслях производства и влияния на экономические показатели.

2.2. Тематический план дисциплины

2.2.1. Тематический план дисциплины для студентов

очно-заочной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела, (отдельной темы)	Кол-во часов по дневной форме обучения	Виды занятий и контроля										
			лекции		ПЗ (С)		ЛР		Самостоятель- ная работа	Тесты	Контрольные работы	ПЗ (С)	ЛР
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	ВСЕГО	100	16	36	-		8		40	3	2		
1.	Введение. Раздел 1. Физические основы механики.	36	6	12			4		14	№ 1	№1		
1.1	Элементы кинематики материальной точки и вращательного движения твердого тела	10	2	6					2				
1.2	Динамика материальной точки и системы материальных точек	10	2	4					4				
1.3	Элементы динамики вращательного движения твердого тела	10	4				4		2				№ 1
1.4	Элементы механики жидкости и газа	6							6				
2	Раздел 2. Молекулярная физика и термодинамика	24	4	10					10	№ 2	№1		
2.1	Кинетические явления и теория идеальных газов	5	1	3					1				
2.2	Основы классической статистической физики	6	1	2					3				
2.3	Явления переноса в неравновесных состояниях	4		2					2				

2.4	Основы термодинамики	7	2	3					2				
2.5	Реальные газы и жидкости	2							2				
3	Раздел 3. Электричество и магнетизм	40	6	14			4		16	№ 3	№2		
3.1	Электрическое поле в вакууме	6	1	2					3				
3.2	Электрическое поле в диэлектриках	4		2					2				
3.3	Проводники в электростатическом поле	4	1	1					2				
3.4	Стационарные токи	6		4					2				
3.5	Магнитное поле в вакууме и в веществе	10	2	1			2		5				№ 2
3.6	Электромагнитная индукция	6	1	3			2						№ 3
3.7	Уравнения Максвелла. Заключение	4	1	1					2				

2.2.2. Тематический план дисциплины для студентов заочной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела, (отдельной темы)	Кол-во часов по дневной форме обучения	Виды занятий и контроля										
			лекции		ПЗ (С)		ЛР		Самостоятель- ная работа	Тесты	Контрольные работы	ПЗ (С)	ЛР
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	ВСЕГО	100	6	40	-		6	6	40	3	2		
1.	Введение. Раздел 1. Физиче- ские основы меха- ники.	36	3	14			4	4	11	№ 1	№1		

1.1	Элементы кинематики материальной точки и вращательного движения твердого тела	10	1	4					5				
1.2	Динамика материальной точки и системы материальных точек	10	1	5			2	2					№ 1
1.3	Элементы динамики вращательного движения твердого тела	10	1	5			2	2					№ 2
1.4	Элементы механики жидкости и газа	6							6				
2	Раздел 2. Молекулярная физика и термодинамика	24	1	8					15	№ 2	№1		
2.1	Кинетические явления и теория идеальных газов	5	0,5	3,5					1				
2.2	Основы классической статистической физики	6		2					4				
2.3	Явления переноса в неравновесных состояниях	4							4				
2.4	Основы термодинамики	7	0,5	2,5					4				
2.5	Реальные газы и жидкости	2							2				
3	Раздел 3. Электричество и магнетизм	40	2	20			2	2	14	№ 3	№2		
3.1	Электрическое поле в вакууме	6	0,5	2,5					3				
3.2	Электрическое поле в диэлектриках	4		2					2				
3.3	Проводники в электростатическом поле.	4	0,5	1,5					2				
3.4	Стационарные токи	6		6									
3.5	Магнитное поле в вакууме и в веществе	11	0,5	3,5			2	2	3				№ 3
3.6	Электромагнитная индукция	5	0,5	2,5					2				
3.7	Уравнения Максвелла. Заключение	4		2					2				

2.3. Структурно-логическая схема дисциплины

Структура учебной дисциплины “Физика. Часть. 1” представлена в виде блок-схемы.



2.4. Временной график изучения дисциплины

№	Название раздела	Продолжительность изучения раздела, в днях
1	Введение. Раздел 1. Физические основы механики.	9 дней
2	Раздел 2. Молекулярная физика и термодинамика	6 дней
3	Контрольная работа № 1	
4	Раздел 3 Электричество и магнетизм	10 дней
5	Контрольная работа № 2	
Итого:		25 дней

2.5. Практический блок

2.5.1. Лабораторные работы

Лабораторные работы для студентов, обучающихся с применением ДОТ, проводятся в течение сессии при наличии лабораторных установок. Описания лабораторных работ приведены в [5]. Если лабораторных установок нет, работы выполняются по виртуальному лабораторному практикуму. Описания виртуальных лабораторных работ и указания по их проведению приведены в методических пособиях [6] и [7]. Для студентов, обучающихся на филиалах, лабораторные работы проводятся в установленном порядке. Отчёты по лабораторным работам с отметкой преподавателя о выполнении и защите должны быть представлены студентом на экзамене.

2.5.1.1. Лабораторные работы

для студентов очно-заочной формы обучения (8 часов)

Номер раздела (темы)	Наименование лабораторных работ	Кол-во часов
Тема 1.3	Определение моментов инерции тел (металлических колец) с помощью маятника Максвелла.	4
Тема 3.5	Магнитное поле в вакууме и в веществе	2
Тема 3.6	Электромагнитная индукция	2

2.5.1.2. Лабораторные работы

для студентов заочной формы обучения (6 часов)

Номер раздела (темы)	Наименование лабораторных работ	Кол-во часов ауд/ДОТ
Тема 1.2	Динамика материальной точки и системы материальных точек	2/2
Тема 1.3	Определение моментов инерции тел (металлических колец) с помощью маятника Максвелла.	2/2
Тема 3.5	Магнитное поле в вакууме и в веществе	2/2

2.6. Рейтинговая система оценки знаний при использовании ДОТ по дисциплине «Физика. Часть 1»

После изучения каждого раздела студент выполняет тренировочный тест. После изучения всего курса необходимо выполнить контрольные тесты, которые размещены на учебном сайте. Каждый правильный ответ на задания контрольного теста оценивается в 1 балл. Максимальное количество баллов за контрольное тестирование – 30. Правильное решение каждой задачи в контрольных работах оценивается в 3 балла. Максимальное количество баллов за контрольные работы – 48. Выполнение и защита каждой лабораторной работы оценивается в 10 баллов. Всего за лабораторные работы – 20 баллов. Досрочное и качественное выполнение заданий оценивается в 2 балла. Максимально каждый студент может получить **100** баллов. **Студенты, набравшие 80 и более баллов, допускаются к экзамену.**

3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ ДИСЦИПЛИНЫ

Библиографический список

Основной:

1. Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие / Т.И. Трофимова. - М.: Высш. шк., 2007.

Дополнительный:

2. Курс физики. Физические основы механики, молекулярная физика и термодинамика: учеб. пособие / В.М. Цаплев, И.Г. Орехова, Е.А. Лиходаева, С.В. Михайлова. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006.

3. Цаплев, В.М. Курс физики. Электричество и магнетизм: учеб. пособие / В.М. Цаплев, И.Г. Орехова, Е.А. Лиходаева. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006, 129 с.

4. Физика: метод. указания к выполнению контрольных работ / сост.: В.П. Дзекановская [и др.]. – СПб.: СЗТУ, 2004.

5. Физика: метод. указания к выполнению лаб. работ по разделам: Ч. 1 и 2/ сост.: А.С. Иванов [и др.]. - СПб.: СЗТУ, 2004.

6. Физика. Часть 1. Виртуальный лабораторный практикум по разделам: Физические основы механики, молекулярная физика, статистическая физика, термодинамика: метод. указ. / сост.: В.М. Цаплев, Ю.И. Кузьмин. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. – 82 с.

7. Физика. Электричество и магнетизм: виртуальный лабораторный практикум: метод. указ. / сост.: В.М. Цаплев, Ю.И. Кузьмин. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2005. – 75 с.

Средства обеспечения освоения дисциплины (ресурсы Internet)

11. <http://db.informika.ru/spe/prog/prog/zip>
12. <http://burma.tsu.tula/>
13. <http://www.gpntb.ru/>
14. <http://www.stup.ac.ru/>
15. <http://www.uw.edu.pl>

16. <http://www.physicon.ru/>
17. <http://www.physics.ru/>
18. <http://elib.nwpi.ru/>

3.2. ОПОРНЫЙ КОНСПЕКТ

ВВЕДЕНИЕ

В основе любой машины, прибора, агрегата лежат либо физические, либо физико-химические явления. Поэтому физика играет особую роль в техническом вузе, так как является фундаментальной базой всех инженерных дисциплин. Практически все достижения технического прогресса, включая транспорт, связь, компьютеры и многое другое, основаны на законах физики.

В экономических науках используются закономерности, подобные физическим. Не случайно, что в настоящее время бурно развивается такое направление науки, как экономическая физика.

Физика изучает простейшие и вместе с тем наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи, и законы её движения.

Для характеристики взаимного расположения тел используется категория понятий – **пространство**. Взаимодействие частиц и тел приводит к различным изменениям в их поведении. Эти изменения, вызванные различными свойствами частиц и полей называют **движением**. Последовательность и направленность изменений (движения) характеризует категория понятий – **время**.

Простейшие формы движения – механическая, тепловая, электрическая, ядерная изучаются в разных разделах физики.

В этом модуле изучаются три раздела физики:

1. Физические основы механики (36 час.). 2. Молекулярная физика и термодинамика (24 час). 3 . Электричество и магнетизм (40 час)

Раздел 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

В разделе 1 изучаются четыре темы: 1.1. Элементы кинематики материальной точки и вращательного движения твердого тела. 1.2. Динамика материальной точки и системы материальных точек. 1.3. Элементы динамики вращательного движения твердого тела. 1.4. Элементы механики жидкости и газа.

Подробное изложение материала раздела представлено в учебном пособии: Цаплев, В.М. Курс физики. Физические основы механики, молекулярная физика и термодинамика: учеб. пособие / В.М. Цаплев, И.Г. Орехова, Е.А. Лиходаева, С.В. Михайлова. - СПб.: СЗТУ, 2006, а также [1], с. 6-39, 43-46, 56-66.

По материалам раздела выполняются задачи 101-141 из контрольной работы № 1, тренировочные тесты (к темам 1.1; 1.2; 1.3) и контрольный тест.

В первом разделе изучается простейшая форма движения – механическая.

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

Любое сложное движение тела, можно представить как совокупность поступательного и вращательного движений.

При **поступательном** движении все точки тела движутся одинаково, а любая линия, мысленно выделенная на поверхности тела, сохраняет положение, параллельное первоначальному. Это позволяет ввести простейшую модель тела, которая называется **материальной точкой**.

Материальная точка – это тело, размерами и формой которого можно пренебречь в рассматриваемой задаче.

При **вращательном** движении все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения. Для упрощения описания вращательного движения тело считается недеформируемым, используют модель **абсолютно твердого тела**.

Абсолютно твердым телом называется тело, расстояния между любыми двумя точками которого постоянны.

Классическая механика изучает движение со скоростями значительно меньшими скорости света в вакууме. Движение тел, скорости которых соизмеримы со скоростью света, изучается в релятивистской механике.

1.1. Элементы кинематики материальной точки и вращательного движения твёрдого тела

Кинематика – это раздел механики, в котором изучаются величины, характеризующие движение и их взаимосвязь, без учета причин определяющих тот или иной вид движения.

1.1.1. Система отсчета. Траектория

Характер движения тела зависит от выбора системы отсчета.

Система отсчета – это совокупность тела отсчета, связанной с ним системы координат, и синхронизированных между собой часов.

Как правило, в физике используют **декартову систему координат**. Положение материальной точки в декартовой системе координат задается тремя числами x, y, z или радиус-вектором \vec{r} (рис. 1.1).

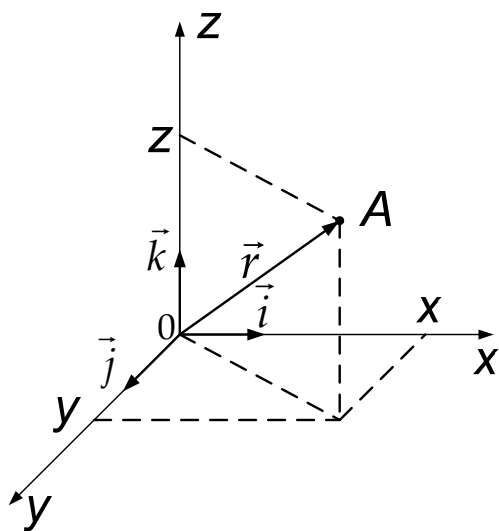


Рис. 1.1

Радиус-вектор \vec{r} можно выразить через координаты его конца

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}, \quad (1.1)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы (орты), совпадающие с положительными направлениями осей Ox, Oy, Oz ; $x\vec{i}, y\vec{j}, z\vec{k}$ – составляющие (компоненты) вектора \vec{r} вдоль этих осей.

Модуль вектора \vec{r} равен

$$|\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (1.2)$$

При движении материальной точки её координаты и радиус-вектор изменяются с течением времени, материальная точка описывает в пространстве линию, называемую **траекторией**.

Траектория – это геометрическое место точек, в которых находится движущееся тело, в последовательные моменты времени.

Уравнение траектории является основной кинематической характеристикой. Зная данное уравнение, можно найти все другие характеристики движения тела в любой момент времени.

Параметрическая форма записи уравнения траектории показывает, как зависят координаты тела от времени (параметра) и имеет вид

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t). \quad (1.3)$$

Векторная форма уравнения траектории эквивалентна выражению

$$\vec{r} = \vec{r}(t). \quad (1.4)$$

Выражения (1.3) и (1.4) называют также **законом движения**. Для прямолинейного движения достаточно задать одно уравнение $x = x(t)$.

Вектор $\Delta\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, соединяющий две точки траектории, называется вектором перемещения.

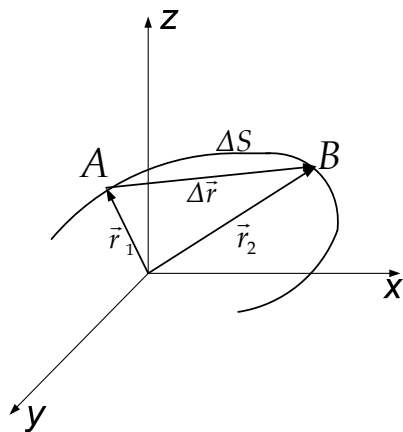


Рис. 1.2

Через координаты точек A и B вектор $\Delta\vec{r}$ выражается так:

$$\Delta\vec{r} = \Delta x \vec{i} + \Delta y \vec{j} + \Delta z \vec{k}. \quad (1.5)$$

$$\Delta x = x_2 - x_1, \quad \Delta y = y_2 - y_1, \quad \Delta z = z_2 - z_1.$$

$$|\Delta\vec{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}. \quad (1.6)$$

Расстояние, пройденное телом за время $\Delta t = t_2 - t_1$ вдоль траектории называется **длиной пути** ΔS (рис. 1.2).

$|\Delta\vec{r}|$ совпадает с ΔS только при прямолинейном движении. В произвольном случае $\Delta S > |\Delta\vec{r}|$.

Модуль бесконечно малого перемещения равен бесконечно малой части траектории $|d\vec{r}| = dS$.

1.1.2. Скорость

Скорость – это физическая величина, характеризующая быстроту перемещения тела по траектории и направление его движения.

Из определения следует, что скорость – векторная величина. Если за равные промежутки времени тело проходит одинаковые пути, то численное значение скорости равно отношению длины пути ко времени: $v = \Delta S / \Delta t$.

В общем случае криволинейного движения скорость в разные промежутки времени может быть разной по величине и по направлению. В связи с этим вводят понятия **средней** и **мгновенной** скоростей.

Вектором средней скорости называется отношение вектора перемещения к промежутку времени.

$$\vec{v}_{\text{cp}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.7)$$

Единица измерения $[v] = 1 \text{ м/с}$. Направление вектора \vec{v}_{cp} совпадает с направлением вектора перемещения $\Delta \vec{r}$ (рис. 1.3).

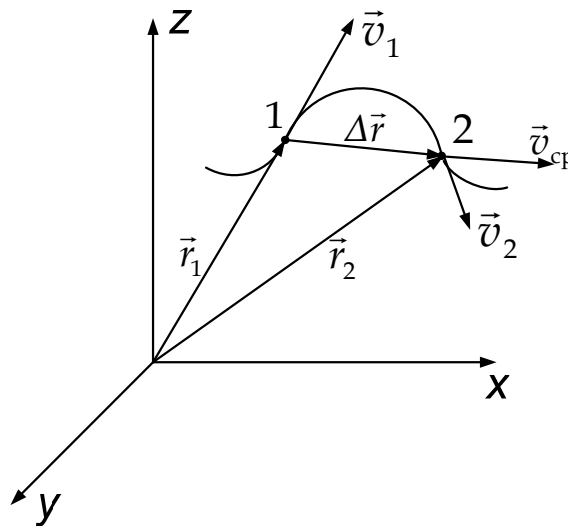


Рис. 1.3

Пользуясь выражением (1.5), получим:

$$\vec{v}_{\text{cp}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \vec{j} + \frac{\Delta z}{\Delta t} \vec{k}, \quad (1.8)$$

здесь $v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, $v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$, $v_z = \frac{\Delta z}{\Delta t}$ – проекции вектора средней скорости на соответствующие оси координат.

Средняя скорость даёт неполную информацию о движении тела, так как в какие-то моменты времени тело двигалось быстро, в какие-то – медленно или

вообще покоилось. Более точно характеризует движение тела **мгновенная** скорость.

Мгновенной скоростью называют скорость тела в данной точке траектории в данный момент времени.

При $\Delta t \rightarrow 0$ перемещение $\Delta \vec{r}$ становится бесконечно малым, а $\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$

становится постоянной, таким образом, **мгновенная скорость**

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (1.9)$$

равна производной радиуса-вектора движущейся точки по времени. Вектор \vec{v} направлен по касательной к траектории в данной точке (рис. 1.3).

Так как $|d\vec{r}| = dS$, то модуль мгновенной скорости равен

$$|\vec{v}| = \frac{|d\vec{r}|}{dt} = \frac{dS}{dt},$$

$$dS = |\vec{v}| dt, \quad (1.10)$$

то длина пути, пройденного точкой за промежуток времени от t_1 до t_2 , вычисляется как криволинейный интеграл

$$S = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt, \quad (1.11)$$

где $v(t)$ – зависимость модуля мгновенной скорости от времени.

1.1.3. Ускорение

Скорость движения материальной точки может изменяться как по величине, так и по направлению.

Физическая величина, характеризующая изменение скорости за единицу времени, называется **ускорением**.

Так же, как для скорости, вводятся понятия среднего и мгновенного ускорений.

Среднее ускорение равно отношению изменения вектора мгновенной скорости $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ к промежутку времени, за которое это изменение произошло. Единица измерения $[a] = 1 \text{ м/с}^2$.

$$\vec{a}_{\text{cp}} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (1.12)$$

Мгновенное ускорение в данный момент времени в данной точке траектории равно пределу этого отношения при $\Delta t \rightarrow 0$, то есть производной скорости по времени:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (1.13)$$

Учитывая выражения для скорости (11), (12) и (13), легко получить аналогичные формулы для ускорения:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2} \vec{k} \quad (1.14)$$

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2}, \quad a_y = \frac{d^2y}{dt^2}, \quad a_z = \frac{d^2z}{dt^2}.$$

Модуль вектора ускорения равен

$$|\vec{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}. \quad (1.15)$$

Таким образом, первая производная от уравнения траектории по времени есть скорость, а вторая производная – ускорение тела. Вопрос о направлении вектора мгновенного ускорения решается в динамике. Это можно сделать в кинематике, если разложить вектор ускорения на две составляющие, характеризующие изменение скорости по величине и по направлению.

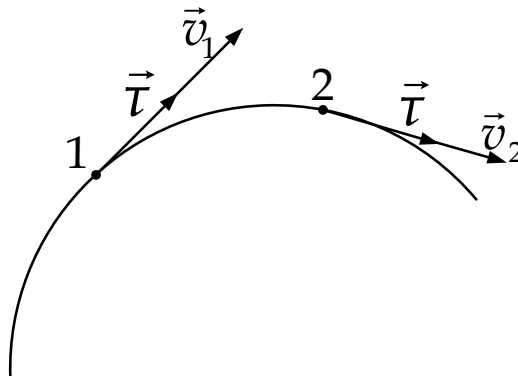


Рис. 1.4

Составляющая ускорения, характеризующая изменение модуля скорости и называется **тангенциальным уравнением**, $\frac{dv}{dt} \cdot \vec{\tau} = \vec{a}_\tau$ вектор \vec{a}_τ – направлен по касательной к траектории.

Составляющая ускорения, характеризующая изменение скорости по направлению, называется нормальным ускорением. Его вектор \vec{a}_n направлен вдоль радиуса кривизны к центру кривизны. Радиус кривизны (R) – это радиус окружности, которая вписывается в заданный участок траектории. Модуль нормального ускорения равен $|\vec{a}_n| = \frac{v^2}{R}$.

Модуль полного ускорения вычисляется по формуле

$$a = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{R}\right)^2} = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \quad (1.16)$$

В зависимости от тангенциальной и нормальной составляющих ускорения движение можно классифицировать следующим образом.

Если $a_\tau = 0$; $a_n = 0$, то движение будет прямолинейным и равномерным.

При $a_\tau = a = \text{const}$; $a_n = 0$ – прямолинейное равнопеременное движение.

При таком виде движения

$$a_\tau = a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}. \quad (1.17)$$

Если в начальный момент времени $t_1 = 0$, а начальная скорость $v_1 = v_0$, то обозначив $t_2 = t$ и $v_2 = v$, получим $a = \frac{v - v_0}{t}$, откуда

$$v = v_0 + at. \quad (1.18)$$

Проинтегрировав эту формулу в пределах от нуля до произвольного момента времени t , найдем, что длина пути, пройденного точкой в случае равнопеременного движения

$$S = \int_0^t v dt = \int_0^t (v_0 + at) dt = v_0 t + \frac{at^2}{2}; \quad (1.19)$$

1.1.4. Кинематика вращательного движения

Простейшим видом вращательного движения твердого тел является вращение вокруг закрепленной оси. В этом случае все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на оси вращения; положение точки удобно характеризовать радиусом соответствующей окружности; все точки тела одной плоскости, проходящей через ось вращения, поворачиваются на одинаковые углы (рис. 1.5).

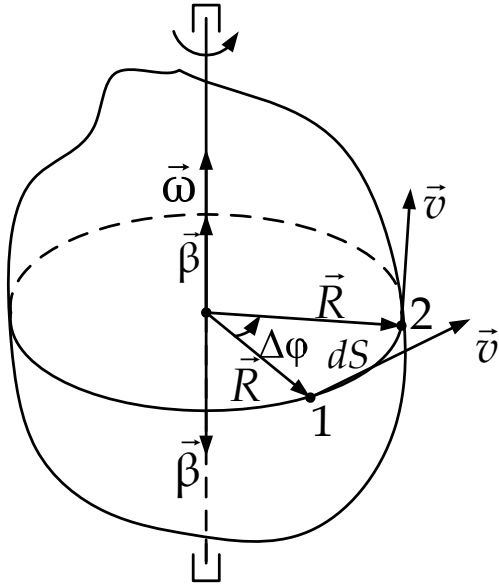


Рис. 1.5

Функция, описывающая зависимость угла поворота φ от времени, называется **законом движения (вращения)**: $\varphi = \varphi(t)$. Это основная кинематическая характеристика вращательного движения.

Быстрота вращения характеризуется **угловой скоростью** ω .

Средняя угловая скорость равна приращению угла поворота за единицу времени

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (1.20)$$

Мгновенная угловая скорость – это производная от угла поворота по времени

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (1.21)$$

Скорость \vec{v} движения точки тела по окружности называется **линейной скоростью**, которая направлена по касательной к траектории. Модуль линейной скорости равен $v = \frac{dS}{dt}$, где dS – дуга окружности. Учитывая, что $dS = R d\varphi$, получим связь между линейной и угловой скоростями:

$$v = \omega R. \quad (1.22)$$

Угловую скорость условно считают вектором, направленным вдоль оси вращения по правилу правого винта. $\vec{\omega}$ – это аксиальный вектор.

Если $\vec{\omega} = \text{const}$ – вращение является **равномерным**. Равномерное вращение можно характеризовать периодом обращения T ; T – это время одного оборота, при этом угол поворота равен 2π . Тогда $\omega = 2\pi/T$; $\frac{1}{T} = \nu$ – частота вращения или число оборотов за 1 с; $\omega = 2\pi\nu$.

Изменение угловой скорости за 1 с характеризуют **величиной углового ускорения** β .

Среднее значение $\bar{\beta}_{\text{cp}} = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t}$, **мгновенное** – $\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$.

Из приведенных выражений видно, что при ускоренном вращении направления векторов $\vec{\omega}$ и $\vec{\beta}$ совпадают, при замедленном – противоположны (рис. 1.5).

Угловое ускорение связано с тангенциальным линейным ускорением:

$a_{\tau} = \beta R$. Нормальное ускорение численно равно $a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$.

Единицы измерения: $[\varphi] = 1 \text{ рад (радиан)}$; $[\omega] = 1 \text{ рад/с} = 1 \text{ с}^{-1}$; $[\varepsilon] = 1 \text{ рад/с}^2 = 1 \text{ с}^{-2}$.

1.2. Динамика материальной точки и системы материальных точек

Опыт показывает, что величины, описывающие движение тела, изменяются при взаимодействии его с другими телами. Раздел механики, изучающий законы движения тел с учетом физических причин, обуславливающих тот или иной характер движения, называется **динамикой**. В основе динамики лежат законы Ньютона, сформулированные им на основе обобщения огромного количества опытных фактов.

1.2.1. Законы Ньютона

Первый закон Ньютона характеризует движение тела, невзаимодействующего с другими телами, то есть свободное от действия других тел и полей.

Первый закон Ньютона. *Существуют такие системы отсчета (СО), в которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор пока на него не подействуют другие тела.*

Свойство тел сохранять своё состояние называется **инертностью**. Свободное движение называется движением **по инерции**, а системы отсчета – **инерциальными**.

Инерциальная СО не влияет на движение тела. Всегда можно найти такую систему отсчета, что её влиянием на движение тела можно пренебречь. Например, СО, связанные с Землей будут инерциальными, если пренебречь её суточным вращением.

Взаимодействие тел проявляется в изменении скорости движения и в деформации тел. Для характеристики взаимодействия используется понятие – **сила**.

Сила – это количественная и качественная мера воздействия на материальную точку или тело со стороны других тел и полей.

Сила – величина векторная. Результат её действия зависит от модуля, направления и точки приложения силы. Если на тело действует несколько сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$, то движение тела будет определяться **векторной суммой** этих сил, называемой **равнодействующей** или **резльтирующей** силой

$$\vec{F}_{\text{рез}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i. \quad (1.23)$$

Качественная мера означает, что существуют различные виды сил. Например, в механике рассматриваются силы тяготения, силы упругости, силы трения.

Второй закон Ньютона. *Ускорение, приобретаемое телом, прямо пропорционально результирующей всех сил, действующих на тело, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе тела:*

$$\vec{a} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{F}_i}{m}, \quad \text{или} \quad m\vec{a} = \vec{F}_{\text{рез}} \quad (1.24)$$

Учитывая, что $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, и полагая $m = \text{const}$, получим

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}_{\text{рез}}. \quad (1.25)$$

Векторная величина $\vec{p} = m\vec{v}$ называется **импульсом (количеством движения)** тела. Выражение $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_{\text{рез}}$ – это более общая формулировка II закона Ньютона, его называют **основным уравнением динамики**.

Из выражения (1.26) видно, что масса (m) – это мера инертности тела. Чем больше масса тела, тем труднее его вывести из состояния покоя или остановить. Более точное определение массы:

Масса – мера инертности тела при поступательном движении и мера тяготения.

Единицы измерения: $[m] = 1 \text{ кг}; \quad [a] = 1 \text{ м/с}^2;$

$[F] = [m] \cdot [a] = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2 = 1 \text{ Н}$ (один Ньютон).

Опыты показывают, что механическое действие двух тел друг на друга носит характер взаимодействия. Третий закон Ньютона дает количественное описание механического взаимодействия.

Третий закон Ньютона: *силы, с которыми два тела действуют друг на друга, всегда равны по модулю и направлены противоположно вдоль прямой, соединяющей эти тела:*

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21},$$

где \vec{F}_{12} – сила, действующая на первое тело со стороны второго; \vec{F}_{21} – сила, действующая на второе тело со стороны первого. Существенно, что эти силы

приложены к разным материальным телам, **всегда действуют парами и являются силами одной природы.**

Третий закон Ньютона в соединении с первым и вторым законами позволил перейти от динамики отдельной материальной точки к динамике произвольной механической системы тел.

1.2.2. Силы в природе и технике

Для применения второго закона Ньютона необходимо знать, от чего зависят и как вычисляются силы. В механике рассматриваются силы тяготения, силы упругости и силы трения.

Силы тяготения

Силы тяготения – это силы притяжения, действующие между любыми материальными телами. Они относятся к гравитационному взаимодействию, которое осуществляется через гравитационное поле.

Исаак Ньютон сформулировал закон **Всемирного тяготения** на основе законов Кеплера и основных законов динамики:

Сила притяжения, действующая между любыми материальными точками, прямо пропорциональна произведению масс этих точек (m_1 и m_2) и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1.26)$$

где G – гравитационная постоянная.

В системе СИ $G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ [Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2\text{]}$.

На все тела вблизи Земли или на её поверхности действует сила тяготения, называемая силой тяжести.

Сила тяжести вычисляется по формуле $F_{\text{тяж}} = mg$. $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ - это ускорение свободного падения.

Силы упругости

Силы упругости возникают при **деформациях** тел.

Деформации – это изменение формы и размеров тел под действием сил.

Деформация называется **упругой**, если размеры и форма тела восстанавливаются после прекращения действия сил. Деформации, которые сохраняются после прекращения действия внешних сил, называются **пластическими**.

При деформации расстояния между молекулами тела изменяются. При увеличении расстояния начинают преобладать силы межмолекулярного притяжения, при уменьшении – силы отталкивания.

Результирующая всех сил межмолекулярного притяжения или отталкивания и есть сила упругости.

Для упругой деформации выполняется **закон Гука**.

Закон Гука. При малых деформациях сила упругости прямо пропорциональна деформации:

$$F = -kx .$$

Знак минус означает, что сила упругости направлена противоположно абсолютной деформации x . k называется коэффициентом упругости или жёсткостью. Он зависит от материала и геометрических параметров тела. Единицы измерения: $[k] = 1 \text{ Н/м}$.

Силы трения

Силы трения возникают при относительном перемещении соприкасающихся тел. Трение между твердыми телами называют **сухим (или внешним)**. В зависимости от характера относительного движения различают **трение скольжения и трение качения**.

Опытным путем установлен **закон трения скольжения**:

$$F_{\text{тр}} = fN , \quad (1.27)$$

где N – сила нормального давления, f – коэффициент трения скольжения, зависящий от свойств соприкасающихся поверхностей.

Сила трения качения меньше силы трения скольжения для данных видов поверхностей и зависит от радиуса катящегося тела r :

$$F_{\kappa} = f_{\kappa} N / r, \quad (1.28)$$

где f_{κ} – коэффициент трения качения.

При движении твердого тела в жидкостях или газах наблюдается **вязкое трение**. Сила вязкого трения (сила сопротивления) при скоростях движения тел, меньших скорости звука в данной среде, прямо пропорциональна скорости:

$$F_{\text{с}} = -\gamma v, \quad (1.29)$$

где γ – коэффициент сопротивления, зависящий от свойств среды, а также от формы и размеров тела. Сила трения всегда направлена противоположно относительной скорости движения.

1.2.3. Законы сохранения

Основной закон классической механики (II закон Ньютона) применяется для описания движения одного тела.

Совокупность тел (материальных точек), взаимодействующих между собой, движение которых рассматривается совместно и одновременно, называется системой тел.

Силы, действующие между телами, называют **внутренними**. Силы, действующие на тела системы, со стороны тел, не входящих в систему, называются **внешними**.

Состояние механической системы характеризуется в каждый момент времени **координатами** тел и их **скоростями** (импульсами).

Несмотря на то, что состояние системы с течением времени изменяется, существуют величины, сохраняющие свои значения при определенных условиях. Это – **энергия, импульс и момент импульса**. Этот факт выражается в **законах сохранения** этих величин.

Закон сохранения импульса. По определению импульсом тела называют величину $\vec{p} = m\vec{v}$. Это динамическая характеристика тела, которая изменяется под действием сил согласно закону Ньютона: $d\vec{p}/dt = \vec{F}_{\text{рез}}$ или $d(m\vec{v})/dt = \vec{F}_{\text{рез}}$.

Систему тел характеризуют вектором импульса. Он равен векторной сумме импульсов всех тел:

Легко доказать, что вектор импульса системы тел изменяется под действием внешних сил

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_{\text{рез}}. \quad (1.30)$$

Это закон изменения вектора импульса системы тел.

Скорость изменения вектора импульса системы тел равна векторной сумме внешних сил, действующих на тела системы.

Если сумма внешних сил равна нулю, то система тел называется **замкнутой** $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$. Тогда из (1.30) получаем

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = 0, \text{ то есть } \vec{p} = \text{const}. \quad (1.31)$$

Это математическое выражение **закона сохранения вектора импульса системы тел.**

Векторная сумма импульсов замкнутой системы тел с течением времени не изменяется.

Это значит, что для двух моментов времени t_1 и t_2 справедливо выражение:

$$\vec{p}_1 = \vec{p}_2 \text{ или } m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 + \dots + m_n \vec{u}_n,$$

где \vec{v}_i и \vec{u}_i – скорости тел в моменты времени t_1 и t_2 соответственно.

Из закона сохранения импульса видно, что внутренние силы не могут изменить импульс системы тел.

При практическом применении этого закона следует иметь в виду: он справедлив в инерциальных системах отсчета; его можно применять для незамкнутых систем в проекциях на такое направление, для которого сумма проекций внешних сил равна нулю; он справедлив для незамкнутых систем тел, если внешними силами можно пренебречь по сравнению с внутренними (например, для удара тел).

1.2.4. Работа силы. Мощность

Процесс изменения состояния тела или системы тел характеризуют физической величиной, называемой **работой**.

Так как изменение состояния тела (перемещение, ускорение, деформации) зависят от величины и направления силы, то естественно **работа силы** зависит от силы и перемещения (рис. 1.16). В простейшем случае прямолинейного движения тела **работа постоянной по величине и направлению силы равна скалярному произведению векторов силы и перемещения**.

$$A = \vec{F} \cdot \Delta \vec{S} = F \Delta S \cos \alpha. \quad (1.32)$$

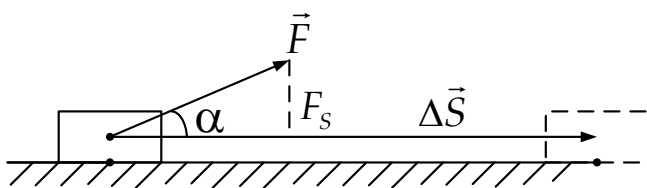


Рис. 1.6

Обозначив $\Delta S - S$ (при прямолинейном движении перемещение равно длине пути), получим:

$$A = F_s \cdot S,$$

где F_s – проекция вектора силы на перемещение.

В реальном случае сила может изменяться по величине и по направлению. Тогда полная работа силы на участке траектории 1- 2 равна интегралу от выражения (1.32):

$$A = \int_1^2 \vec{F} d\vec{r} = \int_1^2 F_s dS. \quad (1.33)$$

Работа упругой силы

Сила упругости при малых деформациях пропорциональна абсолютной деформации $F = kx$, направлена противоположно ей.

Работа силы на участке $(x_1 - x_2)$ равна

$$A = - \int_{x_1}^{x_2} kx dx = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}. \quad (1.34)$$

Работа силы тяжести

Вблизи поверхности Земли сила тяготения практически постоянна и равна по модулю $F = mg$.

При движении тела массой m по некоторой траектории элементарная работа силы тяжести равна (рис. 1.7).

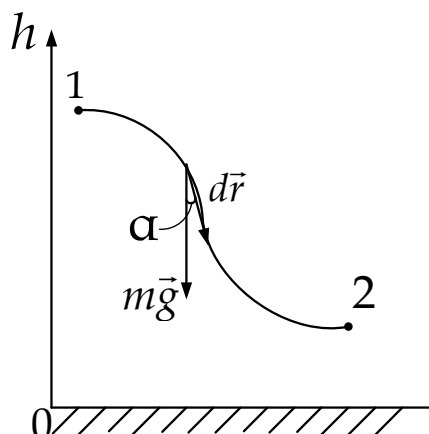


Рис. 1.7

$$dA = mgdr \cos \alpha = -mgdh ,$$

$dh = |d\vec{r}| \cos \alpha < 0$, так как h отсчитывается от поверхности Земли вверх.

Полная работа на участке от h_1 до h_2 равна

$$A = - \int_{h_1}^{h_2} mgdh = mgh_1 - mgh_2 . \quad (1.35)$$

Из выражений (1.34) и (1.35) видно, что работа сил упругости и тяготения не зависят от формы траектории, а зависят только от начального и конечного положения тела. Силы, обладающие этим свойством, называются **консервативными**. Силы трения этим свойством не обладает, их работа всегда меньше нуля и зависит от формы пути. Силы трения не являются консервативными.

Мощность

Изменение состояния системы тел может происходить с разной скоростью. Для характеристики скорости изменения состояния системы тел, то есть совершения работы данной силой используется понятие **мощность**. Мощность равна работе, совершенной за единицу времени: $N = \frac{A}{t}$

Если работа совершается неравномерно, то $N = \frac{dA}{dt}$

Используя определение элементарной работы (33), получим: $N = \frac{\vec{F}d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v}$.

Единицей мощности в СИ является ватт (Вт), $1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$.

1.2.5. Механическая энергия

Одним из самых важных и наиболее часто употребляемых физических понятий является понятие **энергии**.

Энергия – это общая (единая) количественная мера различных форм движения и взаимодействия всех видов материи.

Энергия – это функция параметров состояния системы.

Механическая энергия – это функция состояния, зависящая от координат тел, от сил взаимодействия и от скоростей. Так как процесс перехода системы тел из одного состояния в другое характеризуют **работой**, то имеется связь между энергией системы и величиной работы.

Энергия равна максимальной работе, которую должны совершить силы при переходе системы из данного состояния в состояние равновесия

$$W = A_{\max}.$$

Механическая энергия – это энергия механического движения и взаимодействия тел. Различают кинетическую $W_{\text{кин}}$ и потенциальную энергию $W_{\text{пот}}$. полная механическая энергия равна их сумме:

$$W = W_{\text{кин}} + W_{\text{пот}}.$$

Кинетическая энергия

Кинетическая энергия характеризует **движущееся тело**, измеряется максимальной работой, которую должны совершить силы при торможении тела до полной остановки или для разгона от начальной скорости, равной нулю до заданного значения.

Полная работа сил при изменении скорости тела от v_1 до v_2 равна

$$A = \int_{v_1}^{v_2} mvdv = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (1.36)$$

$$A_{\max} = \frac{mv_2^2}{2} \text{ при } v_1 = 0. \text{ Следовательно, тело массой } m, \text{ движущееся со}$$

скоростью v имеет кинетическую энергию

$$W_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}. \quad (1.37)$$

Из выражения (1.36) видно, что изменение кинетической энергии $\Delta W_{\text{кин}} = W_{2k} - W_{1k}$ равно **работе всех сил**:

$$W_{2k} - W_{1k} = A.$$

Кинетическая энергия скалярная (как и работа) величина всегда положительная. Кинетическая энергия аддитивна, то есть кинетическая энергия системы тел равна сумме кинетических энергий всех тел системы.

Потенциальная энергия

Изменение взаимного расположения тел системы или частей одного тела происходит под действием сил, то есть при совершении работы этими силами. Следовательно, конфигурацию системы можно характеризовать энергией. Механическая энергия, зависящая от взаимного расположения тел и от характера действующих между ними сил, называется **потенциальной энергией**.

Количественно изменение потенциальной энергии равно работе сил. Так работа сил упругости равна

$$A = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}.$$

Потенциальная энергия деформированной пружины равна максимальной работе силы упругости, в результате которой пружина переходит в недеформированное состояние $x_2 = 0$

$$W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}.$$

Тогда $A = W_{\text{п1}} - W_{\text{п2}}$, здесь $W_{\text{п1}} = \frac{kx_1^2}{2}$, $W_{\text{п2}} = \frac{kx_2^2}{2}$ – энергия пружины в моменты времени t_1 и t_2 .

Разность начального и конечного значений какой-либо величины называется её **убылью**. Изменение величины равно

$$\Delta W = W_{\text{п2}} - W_{\text{п1}}.$$

Следовательно, **убыль** величины равна её **изменению** со знаком минус.

Таким образом, работа силы упругости равна убыли потенциальной энергии $A = -\Delta W_{\text{п}}$.

Вблизи поверхности Земли, когда силу тяготения можно считать постоянной, потенциальная энергия системы тело-Земля.

$$W_{\text{п}} = mgh,$$

где h – отсчитывается от поверхности Земли.

Во всех случаях **работа консервативных сил равна убыли потенциальной энергии системы тел.**

1.2.6. Закон сохранения механической энергии

Полная механическая энергия системы тел складывается из кинетических энергий всех тел системы и потенциальной энергии системы в целом

$$W = W_{\text{к}} + W_{\text{п}}.$$

В общем случае на тела системы действуют внешние силы, внутренние консервативные и внутренние неконсервативные силы. Как было показано выше, изменение кинетической энергии тела равно работе всех сил, действующих на него. Легко доказать, что изменение кинетической энергии системы тел подчиняется этому закону.

Тогда

$$W_{\text{к}2} - W_{\text{к}1} = A_{\text{внеш}} + A_{\text{конс}} + A_{\text{неконс}}. \quad (1.38)$$

Учитывая, что работа консервативных сил равна убыли потенциальной энергии, получим:

$$W_{\text{к}2} - W_{\text{к}1} = A_{\text{внеш}} - \Delta W_{\text{п}} + A_{\text{неконс}}. \quad (1.39)$$

Перенесем выражение $-\Delta W_{\text{п}} = W_{\text{п}1} - W_{\text{п}2}$ в левую часть и учтем, что

$$W_{\text{к}1} + W_{\text{п}1} = W_1; \quad W_{\text{к}2} + W_{\text{п}2} = W_2.$$

Тогда

$$W_2 - W_1 = A_{\text{внеш}} + A_{\text{неконс}}. \quad (1.40)$$

Из выражения (1.40) следует:

Изменение механической энергии системы тел равно алгебраической сумме работ всех внешних сил и всех внутренних неконсервативных сил.

Из (1.40) следует, что при $A_{\text{внеш}} = 0$ и $A_{\text{неконс}} = 0$ $W_2 - W_1 = 0$, то есть $W_2 = W_1$, полная энергия с течением времени не изменяется. Приведенные рассуждения составляют содержание **закона сохранения механической энергии**: **Механическая энергия замкнутой системы тел, в которой нет диссипативных сил (сил трения и сопротивления), сохраняется в процессе движения.**

Математически это записывается так:

$$W_1 = W_2 \quad \text{или} \quad W_{1к} + W_{1п} = W_{1к} + W_{2п}. \quad (1.41)$$

Полная механическая энергия не изменяется, поэтому всякое увеличение кинетической энергии сопровождается точно такой же убылью потенциальной энергии и наоборот. Если же в замкнутой системе тел действуют не только консервативные силы, но и диссипативные то её механическая энергия уменьшается, т.к. переходит в другие виды, например, в тепловую, химическую и другие.

Например, полная энергия тела на высоте h равна потенциальной энергии $W_{п} = mgh$, полная энергия тела у поверхности Земли равна кинетической энергии $W_{к} = \frac{mv^2}{2}$. Приравнивая $W_{п} = W_{к}$, $mgh = \frac{mv^2}{2}$, можно найти скорость.

1.3. Элементы динамики вращательного движения твердого тела

Простейший случай вращательного движения – это вращение твердого тела вокруг любой **закрепленной оси**, при котором все точки тела движутся по окружностям. При изучении законов динамики вращательного движения следует иметь в виду, что они установлены для абсолютно твердого тела, а также, что формулы аналогичны формулам поступательного движения. Из курса высшей математики необходимо повторить операции над векторами, особенно векторное произведение, а также понятия производной и интеграла функций.

1.3.1. Момент силы

Опыт показывает, что при вращении вокруг закрепленной оси тело сохраняет состояние покоя или вращается с постоянной угловой скоростью до тех пор, пока на него не подействуют какие-либо силы. Результат действия силы – изменение угловой скорости зависит не только от величины и направления си-

лы, но и от точки приложения. Поэтому действие силы характеризуют понятием **момента силы**. Момент силы определяется относительно центра вращения и относительно оси вращения.

Момент силы относительно центра вращения

Моментом силы \vec{F} относительно неподвижной точки O называется физическая величина, равная векторному произведению радиуса вектора \vec{r} , проведенного из точки O в точку приложения силы, и вектора силы \vec{F} :

$$\vec{M} = [\vec{r} \cdot \vec{F}]. \quad (1.42)$$

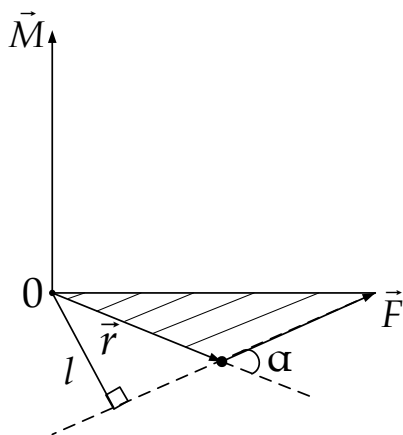


Рис. 1.8

Модуль вектора $M = Fr \sin \alpha$. Направление \vec{M} определяется правилом векторного произведения или правилом правого винта (рис. 1.8). На рис. (1.12) вектор \vec{M} направлен от нас, перпендикулярно плоскости, в которой лежат вектора \vec{r} и \vec{F} .

Величина $l = r \sin \alpha$ называется плечом силы.

Момент силы относительно оси вращения

Моментом силы \vec{F} относительно неподвижной оси Z называется скалярная величина M_z , равная проекции на эту ось момента \vec{M} силы относительно произвольной точки O , лежащей на оси.

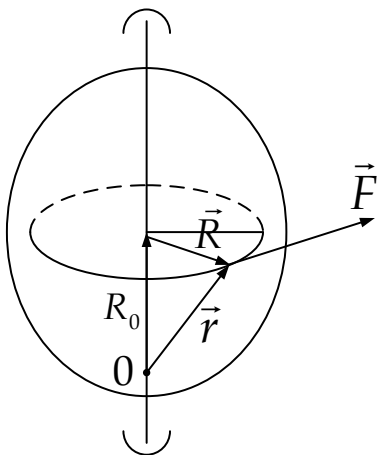


Рис. 1.9

На вращение тела вокруг неподвижной оси влияет только составляющая силы \vec{F} , направленная по касательной к окружности радиуса R - \vec{F}_τ . Составляющие силы вдоль оси и перпендикулярно ей вызывают деформации оси и её креплений. Тогда

$$\vec{M}_z = R \cdot F_\tau. \quad (1.49)$$

Если на тело действует несколько сил, то результирующий момент сил относительно центра равен векторной сумме моментов отдельных сил:

$$\vec{M}_{\text{рез}} = \sum_{i=1} \vec{M}_i. \quad (1.50)$$

1.3.2. Момент импульса

Аналогично моменту силы определяется момент импульса.

Моментом импульса частицы A относительно точки O (рис. 1.10) называют вектор \vec{L} , равный векторному произведению радиус-вектора частицы \vec{r} и вектора импульса $\vec{p} = m\vec{v}$

$$\vec{L} = [\vec{r} \cdot \vec{p}]. \quad (1.51)$$

Из этого определения следует, что вектор \vec{L} является аксиальным вектором, как и момент силы. Направление его совпадает с направлением движения оси правого винта при повороте от \vec{r} к \vec{p} .

Модуль вектора \vec{L} равен

$$L = rp \sin \alpha = lp, \quad (1.52)$$

здесь $l = r \sin \alpha$ – плечо вектора \vec{p} относительно точки O .

Для определения момента импульса твердого тела относительно неподвижной оси, тело разбивают на элементарные массы Δm_i (материальные точки) (рис. 1.11). Определяют моменты импульсов всех элементов Δm_i .

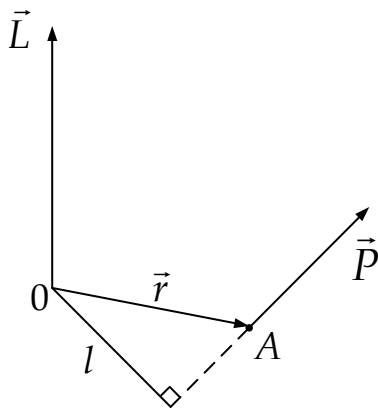
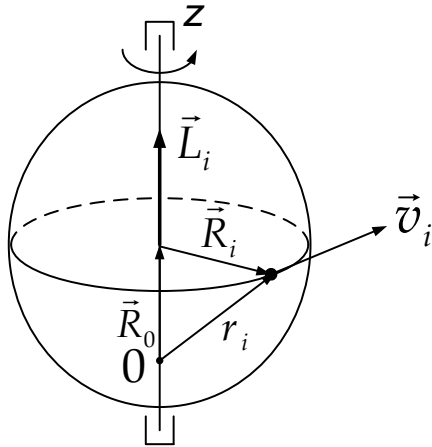


Рис. 1.10



$$\vec{L}_i = [\vec{r}_i \cdot \vec{p}_i]. \quad (1.53)$$

где r_i – расстояние от элемента массы до оси вращения.

Заменяя линейную скорость v_i через угловую ω_i , получим: $L_{zi} = \Delta m_i \cdot r_i^2 \cdot \omega_i$

Рис. 1.11

Учитывая, что все точки тела имеют одинаковые угловые скорости получим для момента импульса твердого тела выражение:

$$L = \sum_{i=1}^N r_i \Delta m_i \cdot r_i \omega_i = \omega \sum_{i=1}^N \Delta m_i r_i^2.$$

Величина $I = \sum_{i=1}^N \Delta m_i r_i^2$ называется **моментом инерции твердого тела относительно оси вращения**. Тогда $L = I\omega$. Поскольку направления векторов \vec{L} и $\vec{\omega}$ совпадают, это равенство можно записать в векторной форме

$$\vec{L} = I\vec{\omega}, \quad (1.54)$$

Следует обратить внимание на аналогию в формулах импульса $\vec{p} = m\vec{v}$ и момента импульса $\vec{L} = I\vec{\omega}$.

1.3.3. Основное уравнение динамики вращательного движения

Согласно второму закону Ньютона изменение вектора импульса тела за единицу времени равно векторной сумме всех сил: $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_{\text{рез}}$.

При вращательном движении **изменение момента импульса материальной точки за единицу времени равно моменту всех сил, действующих на неё**.

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}_{\text{рез}}. \quad (1.55)$$

Внутренние силы попарно равны и противоположны по третьему закону Ньютона, а так же лежат на одной прямой, то есть имеют одинаковое плечо, следовательно, суммарный момент внутренних сил равен нулю.

В результате последнее уравнение примет вид

$$d\vec{L} / dt = \sum_{i=1}^N M_{i \text{ внешн}} . \quad (1.56)$$

Изменение момента импульса твердого тела (системы тел) за единицу времени равно результирующему моменту внешних сил.

В этом выражении момент импульса и моменты сил берутся **относительно одной и той же оси**. Выражение (1.56) называют **уравнением моментов**.

Подставляя в (1.56) $L = I\omega$, получим в проекции на ось Z:

$$\frac{d(I\omega)}{dt} = M_z, \text{ при } I = \text{const} \quad I \frac{d\omega}{dt} = M_z, \quad \frac{d\omega}{dt} = \beta \quad \text{и} \\ I\beta = M_z . \quad (1.57)$$

В такой форме уравнение моментов носит название **основного уравнения динамики вращения твердого тела относительно неподвижной оси**. Угловое ускорение, приобретаемое телом под действием сил, прямо пропорционально сумме моментов сил относительно оси вращения и обратно пропорционально моменту инерции тела относительно той же оси.

$$\beta = \frac{M_z}{I} . \quad (1.58)$$

1.3.4. Момент инерции

Анализ уравнения (1.58) и его сравнение со вторым законом Ньютона $\vec{a} = \vec{F} / m$ позволяет сформулировать следующее определение **момента инерции**.

Момент инерции – это мера инертности тела при вращательном движении.

Чем больше I , тем труднее тело привести во вращение и тем труднее остановить вращающееся тело.

При выводе формулы момента импульса твердого тела для момента инерции было получено выражение

$$I = \sum_{i=1}^N \Delta m_i r_i^2, \quad (1.59)$$

из которого видно, что момент инерции материальной точки массой Δm равен

$$I_0 = \Delta m r^2,$$

где R – кратчайшее расстояние между этой точкой и осью вращения.

Момент инерции характеризует **распределение массы твердого тела** относительно **заданной** оси вращения .

Для тел правильной формы вычисление момента инерции проводится по формуле

$$I = \int r^2 dm = \int \rho r^2 dV, \quad (1.60)$$

где dm , dV и ρ – масса, объем и плотность вещества элемента тела, находящегося на расстоянии R от данной оси. Формулы для моментов инерции диска, кольца, стержня и других тел можно найти в справочнике.

1.3.5. Закон сохранения момента импульса

Из уравнения моментов (1.56) непосредственно вытекает закон сохранения момента импульса. Действительно, при равенстве нулю суммарного момента всех внешних сил $d\vec{L}/dt = 0$. Это означает, что $\vec{L} = \text{const}$.

Закон сохранения момента импульса: если сумма моментов внешних сил относительно оси вращения равна нулю, то момент импульса системы относительно этой оси остается постоянным $\vec{L} = \text{const}$.

Для двух моментов времени t_1 и t_2 выполняется равенство $\vec{L}_1 = \vec{L}_2$ или $I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2$.

Чтобы увеличить скорость вращения, необходимо пропорционально уменьшить момент инерции. Этим пользуются фигуристы, гимнасты, прыгуны в воду. Момент инерции при этом изменяется путем изменения положения рук с горизонтального на вертикальное, то есть путём группировки туловища.

1.3.6. Работа и кинетическая энергия при вращательном движении

Работа внешних сил при повороте на конечный угол φ равна

$$A = \int_0^{\varphi} M d\varphi. \quad (1.61)$$

Для твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, берется результирующий момент всех сил относительно оси вращения.

Кинетическая энергия вращающегося тела равна

$$W_{\text{кин}} = \frac{I\omega^2}{2}.$$

1.4. Элементы механики жидкости и газа

Эту тему следует изучить самостоятельно по учебникам. Подробное изложение материала темы представлено в учебном пособии: Цаплев, В.М. Курс физики. Физические основы механики, молекулярная физика и термодинамика: учеб. пособие / В.М. Цаплев, И.Г. Орехова, Е.А. Лиходаева, С.В. Михайлова. - СПб.: СЗТУ, 2006, а также [1], с. 56...66. Особое внимание обратить на уравнение Бернулли и на механизм возникновения вязкого трения.

Раздел 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

В разделе 2 изучаются пять тем: 2.1. Кинетические явления и теория идеальных газов. 2.2. Основы классической статистической физики. 2.3. Явления переноса в неравновесных состояниях. 2.4. Основы термодинамики. 2.5. Реальные газы и жидкости.

При изучении раздела необходимо выполнять тестовые задания, а затем контрольный тест.

Подробное изложение материала раздела представлено в учебном пособии: Цаплев, В.М. Курс физики. Физические основы механики, молекулярная физика и термодинамика: учеб. пособие / В.М. Цаплев, И.Г. Орехова, Е.А. Лиходаева, С.В. Михайлова. - СПб.: СЗТУ, 2006, а также [1], с. 81...123.

По материалам раздела выполняются задачи 151...171 из контрольной работы № 1, тренировочные тесты (к темам 2.1; 2.4) и контрольный тест.

Молекулярная физика изучает физические свойства макроскопических систем в зависимости от их молекулярного строения, сил взаимодействия между частицами и характера движения этих частиц.

Теоретической основой молекулярной физики являются два взаимно дополняющих друг друга метода – **статистический** и **термодинамический**.

Для описания совокупности большого количества взаимодействующих молекул применяют **статистический** или **молекулярно-кинетический метод**.

Термодинамический метод не связан с какими-либо конкретными представлениями о внутреннем строении тел. Свойства систем изучаются путем анализа энергетических превращений.

Основные положения молекулярной физики

Термодинамической системой называется совокупность тел, обменивающихся между собой, а также с телами вне системы, энергией и веществом.

Примером таких систем могут служить газы, жидкости, твердые тела, плазма или их сочетание. Общим для разнородных по физическим свойствам объектов является то, что они содержат огромное количество атомов, молекул или других частиц.

Молекула – мельчайшая частица вещества, обладающая всеми его свойствами. Размеры молекул очень малы по сравнению с размерами макросистем: от 10^{-10} м (размер атома водорода) до 10^{-7} (размер молекулы белка вируса). Молекулы (атомы) можно наблюдать непосредственно, например, с помощью голографического микроскопа или косвенно в экспериментах (броуновское движение, диффузия, испарение и др.).

Между молекулами действуют силы электромагнитного происхождения: силы притяжения и силы отталкивания.

Массы молекул очень малы. Так масса простейшего атома водорода равна $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг. Поэтому удобнее пользоваться атомной единицей массы

(1 а.е.м.). За 1 а.е.м. принимают $1/12$ массы атома углерода C^{12} . 1 а.е.м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг. Масса молекулы, выраженная в а.е.м. называется молекулярной массой.

Например, молекулярная масса молекулы воды (H_2O) равна $1 \times 2 + 16 = 18$ а.е.м. Количество молекул в данной термодинамической системе называется количеством вещества. За единицу количества вещества принимается количество молекул равное $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$. Она носит название моль. А число $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ называется числом Авогадро по имени ученого, который её ввел. Если система содержит N молекул, то количество вещества равно

$$\nu = \frac{N}{N_A} \text{ моль.} \quad (2.1)$$

Масса моля называется молярной массой (M). Молярная масса численно равна молекулярной, но выражается в единицах СИ в килограммах.

Например, молярная масса воды равна $\mu = 18 \cdot 10^{-3}$ кг. Количество вещества в данной массе вещества m равно

$$\nu = \frac{m}{\mu}. \quad (2.2)$$

Из формул (2.1) и (2.2) следует формула для вычисления количества молекул в массе вещества m :

$$N = \frac{m}{\mu} N_A. \quad (2.3)$$

В зависимости от агрегатного состояния характер движения молекул различен. В газах молекулы движутся хаотически прямолинейно и вращаются. В жидкостях молекулы совершают колебательное движение и одновременно движутся поступательно. В твердых телах возможно лишь колебательное движение.

2.1. Кинетические явления и теория идеальных газов

2.1.1. Уравнение состояния идеального газа. Изопроцессы

Состояние термодинамической системы характеризуется макроскопическими и микроскопическими параметрами. Макроскопические параметры характеризуют состояние системы в целом, это объем (V), давление (P), температура (T), количество вещества (ν). Объем газа и жидкости определяется объемом сосуда, твердого тела – поверхностями раздела с другими телами. Давление $P = \frac{F}{S}$, где F – сила, с которой молекулы действуют на стенки сосуда или любую воображаемую плоскость, перпендикулярную F , S – площадь поверхности, на которую действует сила. Единица измерения $1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

Давлением называется физическая величина P , равная отношению численного значения силы F , нормальной к участку поверхности тела площадью S , к величине S .

Термином **температура** (T) обозначают меру “нагретости” тела. Физический смысл температуры устанавливается термодинамически и статистически и будет рассмотрен в следующих главах. Единица измерения 1 К (кельвин). Шкала Кельвина связана со шкалой Цельсия выражением $T = t^\circ \text{C} + 273$.

Микроскопические параметры – это характеристики отдельных молекул: масса, импульс, энергия. К микропараметрам относят концентрацию молекул $n = \frac{N}{V}$.

Соотношение, связывающее макропараметры, называется уравнением состояния термодинамической системы.

$$f(P, V, T) = 0. \quad (2.4)$$

Если параметры системы одинаковы во всех её точках и не изменяются с течением времени, **состояние называется равновесным.**

Изменение макропараметров по каким-либо причинам или самопроизвольное называется **процессом**. Процесс называется **равновесным**, если сис-

тема переходит из одного равновесного состояния в другое равновесное состояние.

Уравнение состояния содержит практически всю информацию о системе и позволяет предсказать её состояние и практическое использование. Его состояния можно получить экспериментально. Так для разреженных газов при не слишком низких температурах используется уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \nu RT, \quad (2.5)$$

которое является обобщением большого количества опытных данных. Для данной массы газа

$$\frac{PV}{T} = \nu R = \text{const}, \quad (2.6)$$

где $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$ – универсальная газовая постоянная.

Выражение (2.6) называют **объединенным газовым законом**. При любых изменениях параметров для данной массы газа выполняется соотношение:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}. \quad (2.7)$$

Выражение (2.6), примененное к нормальному состоянию ($P = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $T = 273 \text{ К}$; $V_{\text{км}} = 22,4 \text{ м}^3$) для одного кмоль газа ($\nu = 10^3 \text{ моль}$) дает значение универсальной газовой постоянной

$$R = \frac{1,01 \cdot 10^5 \cdot 22,4}{273 \cdot 10^3} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

На практике трудно одновременно наблюдать за изменением всех параметров, поэтому один из параметров поддерживают **постоянным**. Такие процессы называют **изопроцессами**.

$$\text{Изохорный процесс } V = \text{const}, \quad \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \text{const}.$$

$$\text{Изобарный процесс } P = \text{const}, \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \text{const}.$$

$$\text{Изотермический процесс } T = \text{const}, \quad P_1 V_1 = P_2 V_2 = \text{const}.$$

Уравнение Менделеева-Клапейрона можно представить в виде:

$$PV = \frac{N}{N_A RT}, \quad P = nkT, \quad (2.8)$$

где $n = N/V$ – концентрация молекул, $R/N_A = k$ – постоянная Больцмана. Учитывая, что концентрация молекул смеси газов равна сумме концентраций компонентов смеси

$$n = n_1 + n_2 + \dots,$$

из (2.8) получим **закон Дальтона**

$$P = P_1 + P_2 + \dots, \quad (2.9)$$

где P_1, P_2 – парциальные давления компонент смеси.

Для вывода уравнения состояния выбирают подходящую модель молекулярного строения системы. При изучении закономерностей поведения газов используют **модель идеального газа**, которая предполагает, что **молекулы движутся хаотически и имеют различные скорости; соударения молекул между собой и со стенками сосуда упругие; межмолекулярные взаимодействия отсутствуют; собственный объем молекул мал по сравнению с объемом сосуда, в котором находится газ.**

2.1.2. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ) устанавливает связь между макроскопическими и **микроскопическими** параметрами. Так как давление $P = F/S$, то естественно предположить, что оно возникает вследствие передачи молекулами своих импульсов стенке сосуда. По второму закону Ньютона $F = \Delta p / \Delta t$, Δp – изменение импульса молекулы за время Δt . По третьему закону Ньютона такая же сила действует на стенку сосуда. Разделив силу на площадь стенки, получим для давления

$$P = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2 \quad (2.10)$$

В этом выражении использовано понятие **среднеквадратичной скорости**. $n = \frac{N}{V}$ – концентрация молекул.

Выражение (2.10) – это одна из форм записи основного уравнения молекулярно-кинетической теории (МКТ). Оно связывает макропараметр давление с характеристиками отдельных молекул. Выражение (2.10) можно переписать, используя понятие средней кинетической энергии молекулы $\bar{\varepsilon}_k = m\bar{v}^2/2$:

$$P = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}_k. \quad (2.11)$$

Давление численно равно 2/3 от энергии молекул единицы объема газа.

Применяя уравнение Менделеева-Клапейрона в виде (2.8) к выражению (2.11), получим для средней энергии одноатомной молекулы

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{3}{2} kT. \quad (2.12)$$

Макропараметр **температура** с молекулярно-кинетической точки зрения – это **мера хаотического движения молекул**. Число k – постоянная Больцмана имеет смысл коэффициента пересчета температуры (градусов) в единицы шкалы энергии (Джоули).

Из МКТ следует, что **уравнение Менделеева-Клапейрона – это уравнение состояния идеального газа**.

2.1.3. Закон равномерного распределения энергии молекулы по степеням свободы

Число независимых друг от друга движений тела (или независимых координат, определяющих его положение в пространстве) называется числом степеней свободы. У одноатомной молекулы число степеней свободы $i = 3$. У двухатомной с жесткой связью $i = 5$: три поступательных и две вращательных; или – три координаты центра масс молекулы и два угла, определяющих ориентацию оси молекулы. Молекула, имеющая три (и более) атомов, характеризуется числом $i = 6$, три поступательных и три вращательных степени свободы.

Из выражения $\bar{\varepsilon}_k = \frac{3}{2} kT$ можно сделать вывод, что на одну степень свободы молекулы приходится энергия $\varepsilon_0 = \frac{1}{2} kT$. В классической физике счита-

ся, что энергия молекулы равномерно распределяется по степеням свободы. Это выражение является одним из законов классической статистики.

Тогда полная средняя кинетическая энергия молекулы

$$\varepsilon_k = \frac{i}{2} kT. \quad (2.13)$$

2.2. Основы классической статистической физики

При тепловом равновесии координаты и импульсы молекул изменяются случайным образом при их столкновениях. При этом все пространственные положения и направления скоростей равновероятны. Однако численные значения скоростей, импульсов, энергий молекул различны. В то же время средние значения этих величин для данного состояния газа постоянны. Это говорит о том, что системы из большого количества частиц подчиняются закономерностям особого типа – **статистическим закономерностям**, которые подтверждаются экспериментально.

2.2.1. Распределение молекул газа по скоростям

Макроскопические параметры системы зависят не только от средних значений скоростей, но и от их распределения, то есть от того, какова доля молекул, имеющих данное значение скорости. Вероятность того, что в данной системе молекул с концентрацией n встретится молекула со скоростью v пропорциональна $\Delta n_v / n$, где Δn_v – количество молекул с данной скоростью. Так как молекул огромное количество, то встречаются любые значения скорости, то есть скорость изменяется непрерывно. Поэтому весь диапазон скоростей разбивают на участки Δv и находят число молекул, имеющих скорость в интервале от v до $v + \Delta v$. Функция

$$f(v) = \frac{\Delta n_v}{n \cdot \Delta v}, \quad (2.14)$$

показывающая долю молекул со скоростями от v до $v + \Delta v$ в единичном интервале скоростей, называется плотностью вероятности.

Функция распределения молекул по скоростям

$$F(v) = f(v) \pi v^2$$

характеризует вероятность того, что молекулы имеют заданный **модуль** скорости. В явном виде функция распределения молекул по скоростям Максвелла имеет вид:

$$F(v) = \frac{\Delta n_v}{n \cdot \Delta v} \cdot 4\pi v^2 = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right). \quad (2.15)$$

Из распределения Максвелла легко найти формулы для вычисления наиболее вероятной, средней и среднеквадратичной скоростей.

Практически важна зависимость распределения от температуры (рис. 2.1).

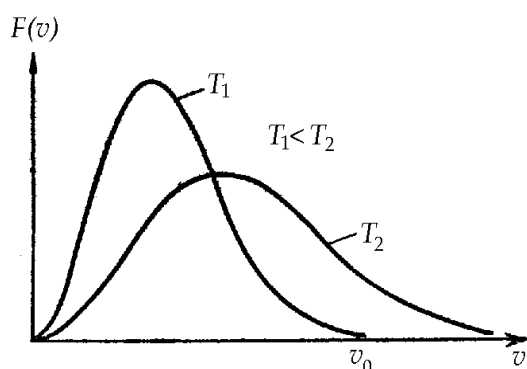


Рис. 2.1

При повышении температуры растет доля быстрых молекул. Этот факт объясняет, почему химические реакции, термоядерные реакции начинаются при меньших температурах, чем теоретические.

2.3. Явления переноса в неравновесных состояниях

При наличии неоднородностей плотности, температуры и других величин наблюдаются необратимые процессы, приводящие к переносу массы dM , энергии (теплоты) dQ , импульса: диффузия, теплопроводность, вязкость.

$$dM = -D \frac{d\rho}{dx} S dt \quad (2.16)$$

$$dQ = -k \frac{dT}{dx} S dt \quad (2.17)$$

$$dF = -\eta \frac{dv}{dz} dS \quad (2.18)$$

Следует усвоить, что все эти явления имеют одинаковый молекулярно-кинетический механизм.

2.4. Основы термодинамики

Простой анализ явлений, происходящих в природе и технике, показывает, что большинство процессов в выделенной системе сводится к обмену энергией

и веществом с другими системами (с внешней средой). В этих случаях применяются законы **термодинамики**. В основе термодинамики лежат три закона или **начала** термодинамики, которые выражают закон сохранения энергии и направление процессов.

2.4.1. Внутренняя энергия

Внутренняя энергия тела включает кинетическую энергию молекул (частиц), потенциальную энергию их взаимодействия, энергию внутримолекулярных, внутриатомных, внутриядерных процессов и энергию электромагнитного излучения, сопровождающего указанные процессы.

В макроскопических процессах все составляющие внутренней энергии, кроме **кинетической и потенциальной энергии молекул**, ничтожно малы.

Для идеального газа внутренняя энергия равна сумме кинетических энергий молекул, так как молекулы не взаимодействуют. Среднее значение кинетической энергии молекулы равно $\varepsilon_{\text{cp}} = \frac{i}{2}kT$

Тогда внутренняя энергия

$$U = N \cdot \frac{i}{2}kT,$$

так как $N = \nu N_A$, а $kN_A = R$, то

$$U = \frac{i}{2}\nu RT. \quad (2.19)$$

Таким образом, внутренняя энергия идеального газа зависит только от его температуры и количества атомов в молекуле.

Внутренняя энергия – это **функция состояния системы**, его однозначная характеристика. Изменение внутренней энергии не зависит от процесса, который приводит к этому изменению, а зависит только от конечного и начального состояний:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{i}{2}\nu R\Delta T. \quad (2.20)$$

Обмен энергией между системой и внешней средой может происходить двумя способами: путем совершения работы и путем теплообмена.

2.4.2. Работа

Работа совершается какими-либо силами при перемещении взаимодействующих с системой тел, которое выражается в изменении объема системы. При расширении газа работа совершается силами давления

$$\delta A = P \Delta V. \quad (2.21)$$

При сжатии газа под действием внешних сил в равновесном процессе в каждый момент времени внешняя сила уравнивается силой давления.

В выражении (2.21) давление постоянно при данном изменении объема. Если же давление изменяется, то при конечных изменениях объема от V_1 до V_2 работа вычисляется путем интегрирования

$$A_{12} = \int_{V_1}^{V_2} P dV. \quad (2.22)$$

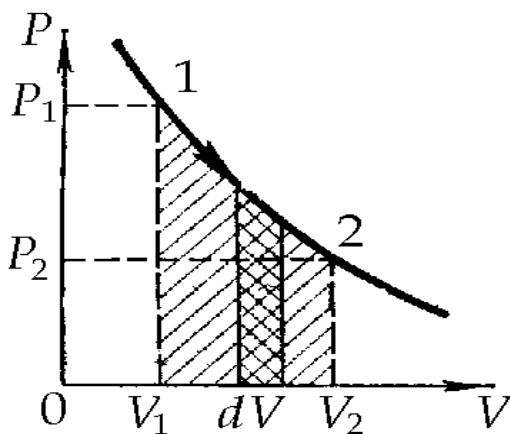


Рис. 2.2

Графически работа равна площади, ограниченной кривой $P = f(V)$ и прямыми V_1 и V_2 (рис. 2.2).

При изменении объема молекулы частично приобретают упорядоченное движение вместе с поршнем.

Поэтому **работа** – это процесс изменения внутренней энергии системы за счет упорядоченного движения молекул.

Из рис. 2.2 видно, что в отличие от внутренней энергии работа зависит не только от параметров конечного (P_2, V_2) и начального (P_1, V_1) состояний, но и от характера процесса 1-2. На этом основано действие всех тепловых машин.

2.4.3. Теплота. Теплоёмкость

Изменение внутренней энергии происходит так же при теплообмене в результате передачи кинетической энергии хаотически движущихся молекул одного тела молекулам другого тела при столкновениях.

Приращение внутренней энергии в процесс чистого теплообмена называется количеством теплоты или просто – **теплотой (Q)**.

Теплота – это процесс изменения внутренней энергии за счет **хаотического (неупорядоченного) движения молекул**.

Изменение параметров системы (P и T) при теплообмене зависит от характера происходящего при этом процесса. Таким образом, **теплота**, как и **работа**, является функцией процесса. Нельзя говорить: “изменение теплоты (или работы)”.

Изменение температуры системы при теплообмене зависит не только от процесса, но и от химической природы вещества, от агрегатного состояния.

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела на один кельвин, называется **теплоемкостью тела**

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right). \quad (2.23)$$

Теплоемкость единицы массы вещества называется удельной теплоемкостью:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{\delta Q}{mdT} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right). \quad (2.24)$$

При изучении газа удобнее пользоваться молярной теплоемкостью

$$C_m = \frac{\delta Q}{\nu \cdot dT} = \mu c \left(\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right). \quad (2.25)$$

где ν – количество вещества, μ – молярная масса.

2.4.4. Первый закон термодинамики

Система, в которой **количество частиц остается неизменным**, может изменять своё состояние только путем обмена энергией с окружающей средой.

Первое начало (закон) термодинамики – это закон сохранения энергии в термодинамических процессах.

Количество теплоты, которое система получает в процессе теплообмена идет на изменение внутренней энергии и на совершение работы

$$Q = U_2 - U_1 + A. \quad (2.26)$$

Формула (2.26) справедлива только для равновесных процессов. Если процесс неравновесный, то его разбивают на столь малые по времени протекающие элементы, чтобы в течение этого времени процесс можно было бы считать равновесным. В этом случае **первое начало** примет вид

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (2.27)$$

Здесь следует принять во внимание обозначения: dU – бесконечно малое **изменение внутренней энергии**, δQ , δA – это количественные характеристики **процесса** изменения энергии – **элементарные теплота и работа**.

2.4.5. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам

Первое начало термодинамики позволяет определить молярную (удельную) теплоемкость, работу, совершаемую системой и оценить практическую эффективность термодинамического процесса. Наиболее простыми являются расчеты для изопроцессов.

Изотермический процесс ($T = \text{const}$)

Уравнение состояния $PV = \text{const}$. Из-за постоянства температуры ($dT = 0$), внутренняя энергия также постоянна ($dU = 0$). Следовательно, первое начало термодинамики имеет вид $\delta Q = \delta A$, то есть вся подводимая теплота идёт на совершение работы. Работа вычисляется по формуле (2.22).

Используя уравнение Менделеева-Клапейрона, получим:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\nu RT}{V} dV = \nu RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (2.28)$$

Изохорный процесс ($V = \text{const}$)

Меняющиеся параметры связаны уравнением состояния $P/T = \text{const}$. График процесса изображен на рис. 2.3.

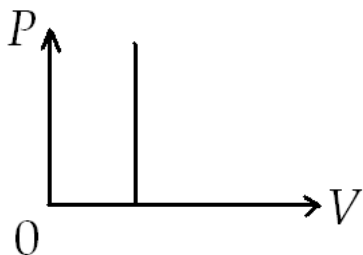


Рис. 2.3

Ясно, что работа $\delta A = PdV$ в изохорном процессе равна нулю, и, следовательно, первое начало термодинамики в этом случае даёт

$$\delta Q = dU.$$

Молярная теплоёмкость C_V равна

$$C_V = \frac{\delta Q}{\nu dT} = \frac{dU}{\nu dT}. \quad (2.29)$$

Учитывая выражение для внутренней энергии $U = \frac{i}{2}\nu RT$ и $dU = \frac{i}{2}\nu R dT$,

получим:

$$C_V = \frac{i}{2}R. \quad (2.30)$$

Изобарный процесс ($P = \text{const}$)

Уравнение состояния имеет вид $V/T = \text{const}$. График процесса приведен на рис. 2.4.

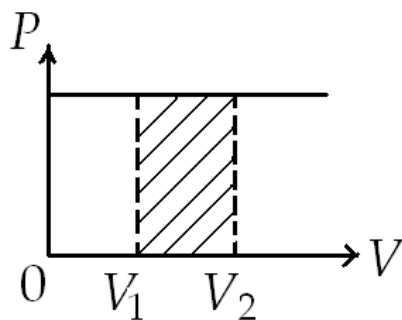


Рис. 2.4

Первое начало термодинамики

$$\delta Q = dU + \delta A$$

Молярная теплоёмкость при постоянном давлении

$$C_P = C_V + R \quad (2.31)$$

Или
$$C_P = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R$$

Работа при изобарном процессе вычисляется по формуле

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV = P(V_2 - V_1). \quad (2.32)$$

Адиабатный процесс

Процесс называется **адиабатным**, если система не участвует в теплообмене с окружающей средой ($Q = 0$). Такой процесс можно осуществить, если создать теплоизоляцию. Но поскольку идеальных теплоизоляционных материалов не существует, то на практике адиабатный процесс осуществляют путем быстрого протекания процесса (сжатия или расширения). Так как $\delta Q = 0$, первый закон термодинамики примет вид

$$dU + \delta A = 0 \quad \text{или} \quad \delta A = -dU, \quad (2.33)$$

то есть работа совершается за счет убыли внутренней энергии. При расширении газа $\delta A > 0$, U — убывает, $dT < 0$ — газ охлаждается. Например, это происходит

при открывании баллонов со сжатым воздухом; с теплым воздухом, поднимающимся вверх (поэтому в горах холоднее) и т.д.

При сжатии газа $\delta A < 0$, тогда $dU > 0$ $dT > 0$ – газ нагревается.

При адиабатном процессе изменяются все параметры состояния. Уравнение состояния (**уравнение Пуассона**) для адиабатного процесса имеет вид:

$$PV^\gamma = \text{const}, \quad (2.34)$$

Здесь $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ – показатель адиабаты. Используя выражения для теплоем-

костей C_p и C_v , получим $\gamma = \frac{C_v + R}{C_v} = \frac{i + 2}{i}$.

2.4.6. Энтропия

Первое начало термодинамики позволяет определить, возможен ли тот или иной процесс с энергетической точки зрения, но ничего не говорит о направлении самопроизвольно протекающих процессов. Например, с точки зрения первого начала возможен самопроизвольный переход теплоты от холодного тела к горячему, хотя в природе такие процессы не наблюдаются. Направление процессов определяет второе начало термодинамики. При этом используется ещё одна функция состояния системы – **энтропия**. Энтропия характеризует степень необратимости процесса. Количественно изменение энтропии равно приведённой теплоте:

$$\frac{\delta Q}{T} = dS, \quad (2.35)$$

где T – температура, при которой происходит теплообмен (вернее, он происходит между телами с температурами T и $T+dT$). Для конечного процесса приведенная теплота равна сумме приведенных теплот, тогда

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}. \quad (2.36)$$

Физический смысл **энтропии** устанавливается на молекулярно-кинетическом уровне методами статистической физики.

Существует несколько возможных микросостояний которые обеспечивают данное макросостояние (например, данную температуру). **Число различных микросостояний, соответствующих данному макросостоянию называется статистическим весом или термодинамической вероятностью данного макросостояния (W).**

Натуральный логарифм этой величины, умноженный на постоянную Больцмана k , и есть **энтропия**

$$S = k \ln W. \quad (2.37)$$

Эта важная формула была получена австрийским физиком Л. Больцманом. Вероятность равновесного состояния (математическая) близка к единице. Состояние, которое осуществляется многими способами, называется **беспорядочным** (хаотическим).

Таким образом, энтропия может рассматриваться как мера беспорядка в термодинамической системе.

Чем сильнее система упорядочена, тем меньше энтропия. Например, твердому телу, в котором атомы закреплены в узлах кристаллической решетки соответствует практически одно микросостояние.

Сообщение системе тепла приводит к усилению теплового движения молекул и, следовательно, к увеличению степени беспорядка в системе и, соответственно, энтропии ($dS = \delta Q/T$).

2.4.7. Второй закон термодинамики

Термодинамическая система, предоставленная самой себе, переходит в наиболее вероятное состояние, которое является равновесным

Обобщение огромного количества опытных данных выражается в виде фундаментального закона природы **второго начала термодинамики**:

В изолированной системе все процессы протекают так, что энтропия не убывает.

$$\Delta S \geq 0. \quad (2.38)$$

Энтропия изолированной системы не изменяется ($\Delta S = 0$), если процесс обратимый или адиабатный и возрастает ($\Delta S > 0$), если процесс необратимый.

Существует несколько других эквивалентных формулировок второго начала термодинамики, они отражают частные случаи, различные стороны проблемы и исторический ход развития знаний в этой области.

Формулировка Клаузиуса: невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме теплоты от холодного тела к горячему.

Формулировка Томсона (Кельвина): невозможно преобразовать в работу всю теплоту, взятую от тела с однородной температурой, не производя никаких других изменений в состоянии системы.

При абсолютном нуле температуры любое тело, как правило, находится в состоянии равновесия. Статистический вес такого состояния равен единице, а энтропия – нулю.

Энтропия любого тела стремится к нулю при стремлении к нулю абсолютной температуры. Это утверждение называют **третьим началом термодинамики**. Из него следует, что теплоемкость тела обращается в нуль при абсолютном нуле.

2.4.8. Тепловые машины

Одним из приложений термодинамики, важным для практики, является теория тепловых машин.

В основе непрерывно действующей машины лежит круговой (циклический) термодинамический процесс.

Круговым процессом (циклом) называется процесс, в результате которого система после ряда изменений возвращается в исходное состояние. Изменение внутренней энергии за цикл равно нулю ($\Delta U = 0$).

Основной характеристикой цикла является коэффициент полезного действия η :

$$\eta = \frac{A_{\text{ц}}}{Q_1}, \quad (2.39)$$

где $A_{\text{ц}}$ – работа, совершаемая за цикл, Q_1 – количество теплоты, полученной системой за цикл.

Тепловая машина – это устройство, в котором часть тепловой энергии преобразуется в механическую энергию. Схематически тепловая машина показана на рис. 2.5.

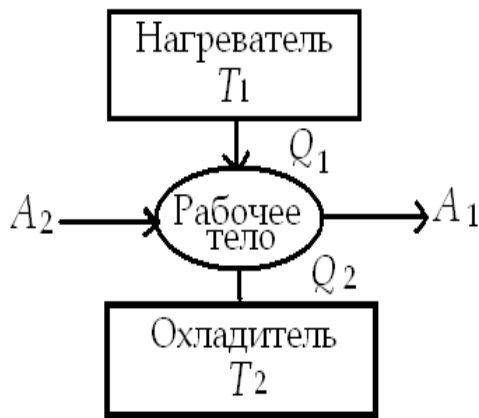


Рис. 2.5

Рабочее тело (газ, пар и др.) получает от нагревателя с температурой T_1 количество теплоты Q_1 . При расширении рабочего тела связанный с ним механизм совершает работу A_1 ; часть теплоты Q_2 отдается охладителю – телу с более низкой температурой T_2 . Для возвращения рабочего тела в исходное состояние внешними силами совершается работа A_2 .

Полезная работа цикла равна

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2 = A_{\text{ц}}. \quad (2.40)$$

Коэффициент полезного действия тепловой машины

$$\eta = \frac{A_{\text{ц}}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (2.41)$$

Для обратимого процесса $\Delta S = 0$, то есть $\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0$ или $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$ и

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (2.42)$$

Тепловая машина, работающая на цикле из обратимых процессов, называется **идеальной**. КПД идеальной тепловой машины определяется по формуле (2.42). Примером идеальной тепловой машины является машина, работающая по циклу Карно, состоящему из двух изотерм и двух адиабат.

2.5. Реальные газы и жидкости

Эту тему следует изучить самостоятельно по учебным пособиям: Цаплев, В.М. Курс физики. Физические основы механики, молекулярная физика и термодинамика: учеб. пособие / В.М. Цаплев, И.Г. Орехова, Е.А. Лиходаева, С.В. Михайлова. - СПб.: СЗТУ, 2006, с. 104...108 или [1], с. 119...124.

Обратите внимание на уравнение Ван-дер-Ваальса и на то, как в нём отражены отличия идеальных газов от реальных газов.

Раздел 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

В разделе 3 изучаются темы: 3.1. Электрическое поле в вакууме. 3.2. Электрическое поле в диэлектриках. 3.3. Проводники в электрическом поле. 3.4. Стационарные токи. 3.5. Магнитное поле в вакууме и веществе. 3.6. Электромагнитная индукция. 3.7. Система уравнений Максвелла. Заключение.

Подробное изложение материала раздела представлено в учебном пособии: Цаплев, В.М. Курс физики. Электричество и магнетизм: учеб. пособие / В.М. Цаплев, И.Г. Орехова, Е.А. Лиходаева. – СПб.: СЗТУ, 2006, 129 с.

По материалам раздела выполняется контрольная работа № 2. тренировочные тесты (к темам 3.1; 3.4; 3.5; 3.6) и контрольный тест.

3.1. Электрическое поле в вакууме

Взаимодействие между электрически заряженными частицами или телами осуществляется посредством электромагнитного поля, которое представляет собой совокупность двух взаимосвязанных силовых полей – электрического и магнитного. Электромагнитное поле в определённых условиях наблюдается отдельно как электрическое и магнитное поля. Это деление относительно и зависит от выбора системы отсчёта, в которой рассматриваются явления.

3.1.1. Основные положения электростатики

Электрическое поле неподвижных заряженных тел, осуществляющее взаимодействие между ними, называется электростатическим полем. Соответственно теория такого поля рассматривается в разделе электродинамики, называемом *электростатикой*. Силы, действующие на заряженные частицы со стороны электростатического поля, называются электростатическими силами.

Источником электростатического поля являются неподвижные заряженные тела.

Электрический заряд – это физическая величина, характеризующая свойство тел или частиц вступать в электрическое взаимодействие. Это понятие в электродинамике является основным, первичным (подобно массе в механике и др.) Заряду присущи следующие фундаментальные свойства: существуют два рода электрических зарядов – положительные и отрицательные; величина заряда не зависит от выбора системы отсчёта, то есть не зависит от того, движется он или покоится; электрический заряд подчиняется закону сохранения. Для электрического заряда выполняется закон сохранения.

Алгебраическая сумма электрических зарядов в изолированной системе не изменяется при любых процессах, происходящих в системе.

Система тел или частиц называется *электрически изолированной* или *замкнутой*, если между нею и внешними телами отсутствует обмен электрическими зарядами.

Опытным путем установлено, что электрический заряд обладает свойством дискретности, т.е. заряд q любого тела состоит из целого числа N элементарных зарядов, приближенно равных $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл ($q = \pm Ne$). Носителями элементарного отрицательного и положительного зарядов являются соответственно электрон и протон. Электроны и протоны входят в состав всех атомов и молекул.

Между разноимённо заряженными телами действуют силы притяжения, между одноимённо заряженными – силы отталкивания. Величина силы взаимодействия зарядов определяется по закону Кулона.

Сила взаимодействия между двумя неподвижными относительно друг друга точечными зарядами в вакууме прямо пропорциональна произведению величин зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F_0 = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где k – коэффициент пропорциональности. В международной системе единиц СИ $k = 1/4\pi\epsilon_0$, где: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Точечный заряд – это заряженное тело, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями до других тел.

Если взаимодействующие заряды находятся не в вакууме, а в какой-либо среде, то величина силы взаимодействия убывает в ϵ раз:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_1}{\epsilon r^2}, \quad (3.1)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Сила направлена вдоль прямой линии, соединяющей эти заряды.

3.1.2. Напряжённость электростатического поля.

Принцип суперпозиции полей

Для обнаружения и исследования электростатического поля используется *пробный заряд*. Величина этого точечного положительного заряда должна быть достаточно малой, чтобы не исказить исследуемое поле, т.е. не вызывать в нем перераспределения зарядов (собственным полем пробного заряда пренебрегают). Если в поле, создаваемое зарядом q , в разных точках помещать пробный заряд q_0 , то на него будет действовать сила \vec{F} , различная в этих точках поля и пропорциональная величине пробного заряда. Однако отношение \vec{F}/q_0 не зависит от q_0 и характеризует электрическое поле в точке, куда помещен пробный заряд. Эта величина называется **напряженностью** и является силовой характеристикой электростатического поля.

Таким образом, **напряженность электростатического поля в данной точке есть векторная физическая величина, равная силе, действующей со стороны поля на неподвижный единичный пробный заряд, помещенный в эту точку поля:**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (3.2)$$

Для точечного заряда сила определяется из закона Кулона. Тогда напряженность поля точечного электрического заряда в вакууме равна

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}. \quad (3.3)$$

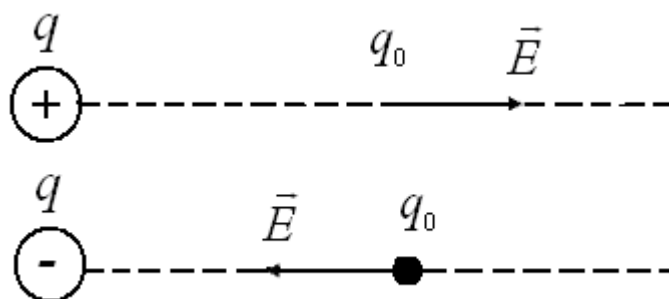


Рис. 3.1

Направление вектора \vec{E} совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд (рис.3.1.). Сила, действующая со стороны электрического поля на точечный заряд q , равна $\vec{F} = q\vec{E}$.

Графически электростатическое поле изображают с помощью *линий напряженности* – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{E} (рис. 3.2).

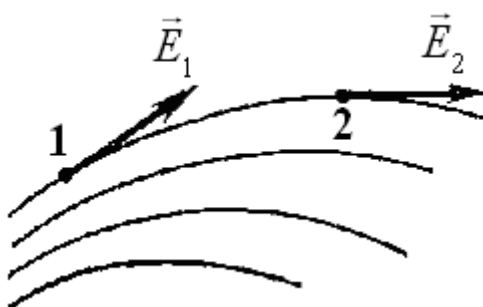


Рис. 3.2

Силовым линиям поля приписывается направление, совпадающее с направлением вектора напряженности. Так как в каждой данной точке пространства вектор \vec{E} имеет лишь одно направление, то линии напряженности никогда не пересекаются. Густотой силовых линий характеризуют напряженность поля: в местах, где напряженность поля меньше, линии проходят реже.

Электрическое поле называется однородным, если во всех его точках напряженность поля одинакова по модулю и направлению ($\vec{E} = \text{const}$).

Каждый заряд создаёт поле независимо от присутствия других зарядов. Поэтому

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i . \quad (3.4)$$

Формула (3.4) выражает *принцип суперпозиции* (наложения) электростатических полей, согласно которому **напряженность результирующего поля, создаваемого в данной точке пространства системой зарядов или заряженных тел, равна геометрической сумме напряженностей полей, создаваемых в этой точке каждым из зарядов системы в отдельности.**

Напряженность является основной силовой характеристикой электрического поля. При расчёте электрических полей вводится вспомогательный *вектор электрической индукции* (электрического *смещения*) \vec{D} , который для изотропных сред связан с вектором \vec{E} соотношением

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E} .$$

Модуль вектора \vec{D} не зависит от свойств среды и не меняется при переходе через границу раздела диэлектриков.

3.1.3. Циркуляция вектора напряженности электростатического поля. Потенциал поля

Под действием кулоновских сил заряженное тело, помещённое в электрическое поле, перемещается, следовательно, кулоновская сила, приложенная к заряду, совершает работу. Напряжённость поля в общем случае различна в разных точках поля. Это значит, что на тело действует переменная сила $\vec{F} = q\vec{E}$, поэтому весь путь разбивают на элементарные участки $d\vec{l}$, в пределах которых напряжённость постоянна. Полная работа равна

$$A_{12} = q \int_1^2 E_l dl , \quad (3.5)$$

где $E_l = E \cos \alpha$ – проекция вектора \vec{E} на перемещение.

Полагая, что заряд q движется в поле точечного заряда q_0 и, подставляя выражение для напряженности $E = \frac{q_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$, и $dl \cos \alpha = dr$, получим:

$$A_{12} = q \int_{r_1}^{r_2} \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} - \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (3.6)$$

Как видно из выражения (3.6) работа не зависит от формы траектории. Работа кулоновской силы по замкнутому пути равна нулю. Тогда

$$A_{12} = q \int_1^2 E_l dl = 0 \quad \text{и} \quad \int E_l dl = 0. \quad (3.7)$$

Интеграл $\int E_l dl$ называется циркуляцией вектора напряжённости. Таким образом, **циркуляция вектора напряжённости электростатического поля по произвольному замкнутому контуру равна нулю.** Следовательно, *кулоновские силы являются консервативными силами.*

Из курса механики известно, что работа консервативных сил равна убыли потенциальной энергии, то есть

$$A_{12} = W_{1n} - W_{2n}.$$

Поэтому работу кулоновских сил (формула (3.6)) можно представить как разность потенциальных энергий, которыми обладает точечный заряд q_0 в начальной и конечной точках поля заряда q :

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r_2} = W_{1n} - W_{2n}. \quad (3.8)$$

Следовательно, потенциальная энергия заряда q_0 , находящегося в поле заряда q на расстоянии r от него, равна

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r}. \quad (3.9)$$

При $r \rightarrow \infty$ потенциальная энергия $W = 0$.

Отношение потенциальной энергии к величине пробного заряда для данной точки поля будет одним и тем же для разных зарядов и может служить однозначной характеристикой данной точки электростатического поля. **Эта величина называется потенциалом и является энергетической характеристикой электростатического поля:**

$$\varphi = \frac{W}{q}. \quad (3.10)$$

Из формулы (3.9) с учетом (3.10) следует, что потенциал точки поля точечного заряда q

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}. \quad (3.11)$$

где r – расстояние от заряда до заданной точки.

Работа, совершаемая силами электростатического поля по перемещению заряда q_0 из точки 1 в точку 2 может быть представлена как

$$A_{12} = W_1 - W_2 = q_0(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3.12)$$

Из формулы (3.12) следует, **что разность потенциалов двух точек электростатического поля – это физическая скалярная величина, определяемая работой, совершаемой кулоновскими силами при перемещении единичного положительного заряда из одной точки в другую.**

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{A_{12}}{q_0}. \quad (3.13)$$

Если перемещать заряд q_0 из произвольной точки за пределы поля, т.е. в бесконечность, где по условию потенциал равен нулю, работа сил электростатического поля $A_\infty = q_0\varphi$, откуда

$$\varphi = \frac{A_\infty}{q_0}. \quad (3.14)$$

Потенциал – это физическая величина, определяемая работой по перемещению единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность.

Единицей измерения потенциала в системе СИ является 1 Вольт (1 В). Из выражения (3.14) следует, что $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$.

3.1.4. Связь между напряжённостью и разностью потенциалов

Напряженность и потенциал – различные характеристики одной и той же точки поля. Естественно, что между ними должна существовать связь.

Для однородного поля модуль напряженности определяется по формуле

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}, \quad (3.15)$$

где d – расстояние между точками 1 и 2; $\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов. Из формулы следует, что единицей измерения напряженности электрического поля является *вольт на метр* (В/м).

Характер распределения напряжённости и потенциала электростатического поля определяет траекторию движения заряженных частиц. За счёт сил электростатического поля изменяется кинетическая энергия частиц:

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3.16)$$

3.1.5. Теорема Гаусса и её применение для расчёта электростатических полей

Для расчёта электростатических полей используются в основном три способа. Расчёт поля точечных зарядов основан на принципе суперпозиции полей; поля заряженных тел правильной формы рассчитывают с помощью теоремы Гаусса. В произвольном случае используют связь между напряжённостью и потенциалом, который определяется экспериментально.

Для того чтобы отразить тот факт, что источником электрического поля являются заряды, используют понятие потока вектора напряжённости.

Потоком вектора напряжённости через какую-либо поверхность называется количество линий вектора \vec{E} (или другого вектора), пересекающих данную поверхность.

Так как количество линий может быть любым, то условились, через плоскую поверхность в 1 м^2 , перпендикулярную силовым линиям однородного поля, проводить количество силовых линий, численно равное величине вектора \vec{E} . Тогда поток Φ_E через площадку, площадью S , нормаль к которой составляет угол α с линиями вектора \vec{E} , равен $\Phi_E = ES \cos \alpha$. (рис. 3.3).

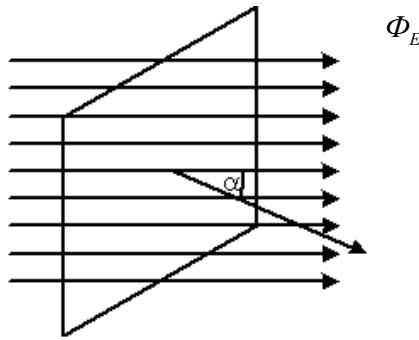


Рис. 3.3

В случае неоднородных полей и произвольной формы поверхности последнюю разбивают на бесконечно малые площадки dS , в пределах которых поле можно считать однородным. Вычисляют элементарный поток $d\Phi_E = E dS \cos \alpha = E_n dS$, затем интегрируют это выражение по всей поверхности:

$$\Phi_E = \int_S E_n dS.$$

Поток через замкнутую поверхность записывается в виде

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS. \quad (3.17)$$

Теорема Гаусса устанавливает связь между потоком вектора через замкнутую поверхность и величиной заряда, заключённого внутри поверхности. Теорема Гаусса. **Поток вектора напряженности электростатического поля в вакууме сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов, деленной на электрическую постоянную.**

$$\oint_S E_n dS = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{\epsilon_0} \quad (3.18)$$

Аналогичная теорема справедлива для вектора электрической индукции:

$$\oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^N q_i. \quad (3.19)$$

Физический смысл теоремы Гаусса состоит в том, что источником электростатического поля являются электрические заряды.

3.2. Электрическое поле в диэлектриках

Диэлектриками называют вещества, в которых при обычных условиях практически нет свободных зарядов, которые могли бы перемещаться под действием электрического поля. К диэлектрикам относятся все газы, если они не подвергаются ионизации, некоторые жидкости (бензол, растительные и синтетические масла) и твердые вещества (фарфор, стекло, парафин, кварц и др.).

3.2.1. Поляризация диэлектриков

Молекулы диэлектрика электрически нейтральны, т.е. суммарный заряд электронов и атомных ядер, входящих в состав молекулы, равен нулю. Тем не менее, *они обладают электрическими свойствами*. В зависимости от взаимного положения зарядов молекулы могут быть полярными и неполярными. У полярных молекул отрицательные заряды сдвинуты от положительных на некоторое расстояние. Приблизительно такую молекулу можно рассматривать как электрический диполь с электрическим моментом $\vec{p} = q\vec{l}$, где q – суммарный положительный заряд всех атомных ядер в молекуле; \vec{l} – вектор, проведенный из центра распределения электронов в молекуле в центр распределения положительных зарядов атомных ядер. Неполярные молекулы собственным дипольным моментом не обладают: у них центры положительного и отрицательного зарядов совпадают.

В электрическом поле происходит ориентация дипольных моментов в полярных диэлектриках. В неполярных диэлектриках молекулы приобретают дипольные моменты, направленные вдоль поля.

В результате на поверхностях диэлектрического материала, перпендикулярных линиям напряжённости внешнего поля выступают электрические заряды противоположных знаков, которые называются **связанными**. Диэлектрик, находящийся в таком состоянии, называется *поляризованным*.

3.2.2. Электрическое поле в диэлектриках

Связанные заряды создают поле, направленное противоположное внешнему. Таким образом, поляризация диэлектрика вызывает ослабление в нем поля по сравнению с первоначальным внешним полем. Электрическое поле в диэлектрике является суперпозицией внешнего поля сторонних – не входящих в состав молекул диэлектрика зарядов \vec{E}_0 и поля связанных зарядов \vec{E}' .

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'.$$

Модуль напряженности результирующего поля внутри диэлектрика

$$E = E_0 - E'.$$

Напряжённость электрического поля E' пропорциональна напряжённости результирующего поля: $E' = \chi E$, где χ – диэлектрическая восприимчивость вещества.

Тогда $E = E_0 - \chi E$. Откуда

$$E = (1 + \chi) E_0 = \varepsilon E_0, \quad (3.20)$$

где $\varepsilon = 1 + \chi$ – диэлектрическая проницаемость вещества. Диэлектрическая проницаемость является основной электрической характеристикой диэлектрика. Значения её зависят от природы диэлектрика и колеблются в пределах от единицы до многих тысяч (у некоторых керамик).

Так как $\varepsilon \vec{E} = \vec{E}_0$, то $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}_0 = \vec{D}_0$, т.е. электрическое смещение внутри диэлектрика совпадает с электрическим смещением внешнего поля \vec{D}_0 .

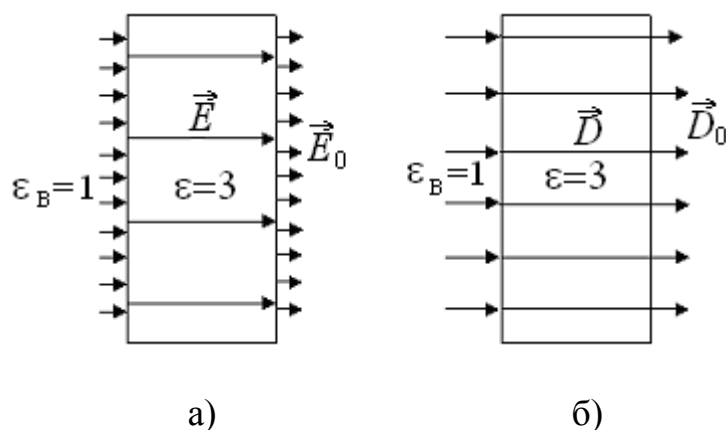


Рис. 3.4

3.3. Проводники в электростатическом поле

3.3.1. Влияние проводника на электрическое поле

Поведение проводников в электрическом поле рассматривается с двух сторон: 1) влияние незаряженного проводника на электрическое поле, в которое его поместили, и 2) электрическое поле заряженного проводника.

Если поместить проводник во внешнее электростатическое поле, то это поле будет действовать на свободные заряды проводника, в результате чего они начнут перемещаться – положительные вдоль поля, отрицательные – против поля. В идеальных проводниках, какими являются металлы, свободные электроны перемещаются против поля, оставляя на прежнем своём месте некомпенсированные положительные заряды (рис. 3.5, а). Эти заряды называются индуцированными, явление – электрической индукцией. Процесс происходит до тех пор, пока не установится равновесное распределение зарядов, при котором электростатическое поле внутри проводника обращается в нуль (рис. 3.5, б), так как поле индуцированных зарядов компенсирует внешнее поле. Равновесие означает, что движение зарядов на поверхности проводника отсутствует. Тогда вектор напряжённости на внешней поверхности проводника перпендикулярен в каждой точке. Из этого следует, что поверхность проводника является эквипотенциальной. Все заряды располагаются на поверхности проводника.

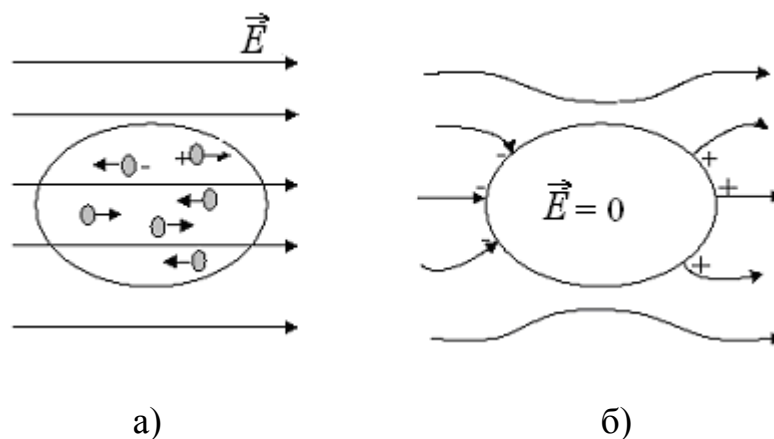


Рис. 3.5

3.3.2. Электрическое поле заряженного проводника. Электроёмкость

Если проводнику сообщить заряд, то он также будет распределяться по поверхности (одноимённые заряды отталкиваются) до тех пор, пока не наступит равновесие. Вектора напряжённости поля заряженного проводника перпендикулярны поверхности, потенциалы всех точек одинаковы. Заряды и электрическое поле внутри проводника отсутствуют. Применяя теорему Гаусса, легко показать, что напряжённость поля вблизи поверхности пропорциональна локальной поверхностной плотности заряда: $E = \sigma / \varepsilon_0$. На выступах (остриях) плотность зарядов больше, напряжённость поля больше. Это приводит к ионизации окружающих молекул воздуха и к “стеканию” зарядов.

Опыт показывает, что разные проводники, будучи одинаково заряженными, имеют различные потенциалы. При этом, как было показано выше, между зарядом и потенциалом существует прямая пропорциональная зависимость. Для уединенного проводника (вблизи проводника нет других проводников) можно записать

$$q = C\varphi, \quad (3.21)$$

где C – коэффициент пропорциональности, равный $C = \frac{q}{\varphi}$ называется *электрической ёмкостью* (ёмкостью) уединенного проводника. **Ёмкость уединенного проводника есть физическая скалярная величина, характеризующая способность проводника накапливать электрические заряды.**

Так как заряды распределяются на внешней поверхности проводника, ёмкость проводника зависит от его размеров и формы, но не зависит от материала, агрегатного состояния и наличия полостей внутри проводника.

Единицей ёмкости в СИ является *фарад* (Φ): 1 Φ – это ёмкость такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл.

Используя формулу связи напряжённости и потенциала можно найти потенциал шара $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R}$ и ёмкость шара:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R.$$

Существенное влияние на электроёмкость оказывает наличие вблизи других проводников

Устройства, обладающие способностью накапливать значительные по величине заряды при малых размерах называются **конденсаторами**.

Конденсатор представляет собой систему двух проводников (обкладок), разделенных диэлектриком. Проводникам придают такую форму, чтобы поле, создаваемое накапливаемыми зарядами, было сосредоточено в узком зазоре между обкладками конденсатора. В зависимости от геометрии обкладок конденсаторы делятся на плоские, цилиндрические и сферические.

Емкостью конденсатора называется физическая величина, равна отношению заряда q , накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов между обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}. \quad (3.22)$$

Электроёмкость плоского конденсатора равна

$$C = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{d}. \quad (3.23)$$

3.3.3. Энергия электростатического поля

Заряженные проводники обладают энергией. В этом легко убедиться, соединяя обкладки заряженного конденсатора проводником. Сближение проводников приводит к искрению. Таким образом, энергия заряженного проводника превращается в световую, механическую, тепловую.

Энергия заряженного уединенного проводника равна работе, которую необходимо совершить, чтобы зарядить этот проводник и вычисляется по формулам:

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\varphi}{2}. \quad (3.24)$$

Соответственно, энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (3.25)$$

Используя формулу электроёмкости плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$ и формулу связи разности потенциалов и напряженности для однородного поля, легко получить выражение для энергии заряженного плоского конденсатора через напряжённость:

$$W = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} Sd = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} V, \quad (3.26)$$

где $V = Sd$ – объем конденсатора.

Выражение (3.26) справедливо для конденсатора любой формы. Объемная плотность энергии (энергия единицы объема) электростатического поля равна

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2} = \frac{D^2}{2\epsilon \epsilon_0}. \quad (3.27)$$

3.4. Стационарные токи

3.4.1. Электрический ток и его характеристики

Энергия электрического поля преобразуется в другие виды благодаря использованию электрического тока.

Электрическим током называют упорядоченное движение заряженных частиц или заряженных макроскопических тел.

Упорядоченное движение в веществе или вакууме свободных заряженных частиц под действием электрического поля называют **током проводимости**. Для возникновения и поддержания электрического тока проводимости необходимы два основных условия: наличие свободных носителей тока (свободных зарядов); наличие электрического поля, создающего упорядоченное движение свободных зарядов. Вещества, в которых имеются свободные заряженные частицы, называются проводниками. Носителями зарядов в металлах являются свободные электроны; в газах – электроны и ионы; в жидкостях –

электролитах – положительные и отрицательные ионы; в полупроводниках – электроны проводимости и дырки. В отсутствии электрического поля заряженные частицы совершают хаотическое движение. Под действием электрического поля скорости частиц приобретают составляющие, направленные вдоль поля, отрицательные – против поля, возникает электрический ток. За направление электрического тока условно принимают направление движения положительных зарядов.

Количественной мерой электрического тока является *сила тока* I – скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение S проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (3.28)$$

Ток, сила и направление которого не изменяются с течением времени, называется *постоянным* $I = q / t$.

Электрический ток, изменяющийся с течением времени, называется *переменным*. Примером такого тока является синусоидальный электрический ток

Единица силы тока в СИ является – *ампер* (А).

Заряженные частицы – носители тока в разных точках поперечного сечения проводника могут распределяться неравномерно. Поэтому, кроме величины тока, вводится понятие плотности тока. *Плотностью тока* \vec{j} называют векторную физическую величину, совпадающую с направлением тока в рассматриваемой точке и численно равную отношению силы тока dI , проходящего через элементарную поверхность, перпендикулярную направлению тока, к площади этой поверхности:

$$j = \frac{dI}{dS}. \quad (3.29)$$

Единица плотности тока – *ампер на квадратный метр* (А/м²).

Плотность постоянного электрического тока одинакова по всему поперечному сечению однородного проводника. Поэтому для постоянного тока в

однородном проводнике с площадью поперечного сечения S сила тока равна $I = jS$.

3.4.2. Закон Ома для однородного участка цепи

Проводник с током отличается от заряженного проводника тем, что его поверхность не является эквипотенциальной, линии вектора напряжённости направлены под некоторым углом к поверхности, то есть имеется составляющая вектора, которая создаёт силу, перемещающую положительные заряды вдоль линий вектора. Линии вектора напряжённости направлены всегда в сторону убывания потенциала. Следовательно, вдоль проводника с током наблюдается падение потенциала (падение напряжения). Экспериментально установлено, **что сила тока в однородном проводнике пропорциональна разности потенциалов на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению проводника (закон Ома для участка цепи):**

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.30)$$

где R – *электрическое сопротивление* проводника. Для однородного цилиндрического проводника длиной l и площадью поперечного сечения S сопротивление определяется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.31)$$

где $\rho = \frac{RS}{l}$ – удельное сопротивление (сопротивление однородного цилиндрического проводника имеющего единичную длину и единичную площадь поперечного сечения), зависит от материала проводника и его температуры.

Единица сопротивления – *ом*: 1 Ом – сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет постоянный ток силой 1 А.

Закон Ома можно представить в дифференциальной форме, которая устанавливает связь между вектором плотности тока и вектором напряжённости

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}. \quad (3.32)$$

Это соотношение справедливо и для переменных полей.

3.4.3. Электродвижущая сила источника тока.

Закон Ома для неоднородного участка цепи

Если в цепи на носители тока действуют только силы электростатического поля, то происходит перемещение положительных зарядов от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом, а отрицательные заряды движутся в обратном направлении. Это приводит к выравниванию потенциалов во всех точках цепи и к исчезновению тока. Иными словами, кулоновские силы не могут поддерживать электрический ток, так как в результате их действия стационарное поле переходит в статическое. Поэтому для поддержания постоянной разности потенциалов в цепи необходимо наличие некоторых сил не электростатического происхождения, которые способны перемещать положительные заряды в сторону возрастания потенциала. Такие силы называются сторонними. **Устройства, в которых сторонние силы поддерживают постоянную разность потенциалов, называют источниками тока.** В источниках тока происходит преобразование различных видов энергии в электрическую. Физическая природа сторонних сил может быть различной. Это определяет различие источников тока: химические (аккумуляторы), механические (генераторы), тепловые (термоэлементы), оптические (солнечные батареи) и др.

Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов. Таким образом, на концах внешней цепи поддерживается постоянная разность потенциалов и в цепи протекает постоянный электрический ток.

Физическая величина, определяемая работой сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда, называется **электродвижущей силой (ЭДС) источника**:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q_0}, \quad (3.33)$$

Единица ЭДС – вольт (В).

На заряд q_0 помимо сторонних сил F_{cm} действуют также силы электростатического поля (кулоновские силы) $\vec{F}_k = q_0 \vec{E}$. Таким образом, результирующая сила, действующая в цепи на заряд q_0 , определяется следующим образом:

$$\vec{F} = \vec{F}_{ct} + \vec{F}_h = q_0 (\vec{E}_{ct} + \vec{E})$$

Работа, совершаемая результирующей силой при перемещении заряда q_0 на участке 1-2 цепи, равна

$$A_{12} = q_0 \varepsilon_{12} + q_0 (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3.34)$$

Разделив (3.34) на q_0 , получим формулу для величины, называемой электрическим напряжением:

$$\frac{A_{12}}{q_0} = U_{12} = \varepsilon_{12} + (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3.35)$$

Напряжением на участке цепи называется физическая величина, равная работе, совершаемой суммарным полем кулоновских и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на этом участке.

Таким образом, напряжение является более общим понятием, чем разность потенциалов: напряжение на участке цепи равно разности потенциалов только в том случае, если на этом участке не действует ЭДС, т.е. сторонними силами не совершается работа. Такой участок электрической цепи называется *однородным*.

Закон Ома для неоднородного участка цепи

С учетом сторонних сил закон Ома в дифференциальной форме имеет вид

$$\vec{j} = \gamma (\vec{E} + \vec{E}^*). \quad (3.36)$$

Это выражение справедливо для неоднородного участка цепи, на котором действуют сторонние силы.

В частности, когда электрический ток течёт вдоль тонкого проводника, направление тока совпадает с направлением оси провода и плотность тока

практически одинакова по всему сечению, то $IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon$. Выражая силу тока, получим закон Ома для неоднородного участка цепи:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{R}. \quad (3.37)$$

Закон Ома для замкнутой цепи

Для замкнутой цепи точки 1 и 2 совпадают, $\varphi_1 - \varphi_2$ и закон Ома приобретает вид

$$I = \frac{\varepsilon}{R}.$$

В замкнутой цепи ток течёт в том числе и через источник, который имеет некоторое сопротивление r . Таким образом, полное сопротивление цепи включает сопротивление внешней цепи (нагрузка) – R и сопротивление источника тока r . Тогда

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (3.38)$$

3.4.4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца

Рассмотрим однородный проводник, по концам которого приложено напряжение U . За время dt через поперечное сечение проводника переносится заряд **$dq = Idt$** . Так как ток представляет собой перемещение заряда dq под действием электрического поля, то работа тока есть

$$dA = Udq = UI dt. \quad (3.39)$$

Используя закон Ома для однородного участка цепи, формулу (3.41) можно представить в виде

$$dA = \frac{U^2}{R} dt = I^2 R dt. \quad (3.40)$$

Мощность электрического тока – это быстрота совершения работы, т.е.

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{U^2}{R} = I^2 R. \quad (3.41)$$

Единица мощности – *ватт*: 1 Вт – мощность, выделяемая в проводнике за 1 с при протекании тока силой 1 А.

Если ток протекает по неподвижному металлическому проводнику, то вся работа тока затрачивается на его нагревание и по закону сохранения энергии $dQ = dA$.

Таким образом, с учетом (3.40) и (3.41) получим:

$$dQ = UI dt = \frac{U^2}{R} dt = I^2 R dt . \quad (3.42)$$

Количество теплоты, выделяющееся за конечный промежуток времени от 0 до t при прохождении постоянного тока силой I найдем, интегрируя выражение (3.42):

$$Q = \int_0^t UI dt = UI t = \frac{U^2}{R} t = I^2 R t . \quad (3.43)$$

Таким образом, *количество теплоты, которое выделяется в проводнике с током, пропорционально квадрату силы тока, времени его протекания и сопротивлению проводника*. Выражение (3.43) есть закон Джоуля-Ленца для участка цепи постоянного тока.

3. 5. Магнитное поле в вакууме и в веществе

В этой главе изучаются свойства и взаимодействие движущихся электрических зарядов. Следует уяснить, что движение электрических зарядов изменяет свойства окружающего их пространства. Кроме электрических сил, появляются магнитные силы взаимодействия, которое осуществляется через магнитное поле.

Магнитные силы возникают только при движении зарядов, то есть магнитное поле имеет относительный характер, оно наблюдается только в тех системах отсчета, относительно которых движется заряженное тело.

Знание законов магнетизма необходимо для понимания принципа действия большого количества машин, приборов, материалов, технологических процессов. В автомобильной технике используются генераторы переменного тока, электродвигатели, электроизмерительные приборы, в которых используется магнитное поле.

3.5.1. Вектор магнитной индукции.

Вектор напряженности магнитного поля

Опыт показывает, что движущиеся заряды действуют на магнитную стрелку, следовательно, создают не только электрическое, но и магнитное поле. Источниками магнитного поля являются также электрические токи, намагниченные вещества и переменные электрические поля. Обнаружить магнитное поле можно по отклонению движущихся заряженных частиц, по движению проводников с током или по повороту рамки с током, по отклонению магнитной стрелки. Магнитное поле относительно, оно существует только в тех системах отсчёта, относительно которых движутся заряженные частицы.

Одной из основных характеристик магнитного поля является вектор магнитной индукции \vec{B} . Направление вектора \vec{B} совпадает с направлением северного полюса магнитной стрелки. Модуль вектора магнитной индукции определяется по величине силы, действующей на движущиеся заряды или токи в магнитном поле.

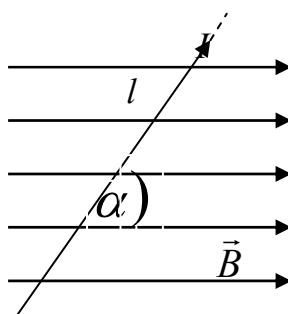


Рис. 3.6

Сила, действующая на проводник длиной $d\vec{l}$ с током I в однородном магнитном поле, пропорциональна силе тока, длине проводника, магнитной индукции и зависит от положения проводника в магнитном поле. Она называется силой Ампера:

$$d\vec{F}_A = I[d\vec{l} \cdot \vec{B}], \quad dF_A = Idl \cdot B \sin \alpha, \quad (3.44)$$

где α – угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{B} ; направление вектора $d\vec{l}$ совпадает с направлением тока; векторная величина $Id\vec{l}$ называется элементом тока.

Из (3.44) следует одно из определений магнитной индукции.

Магнитная индукция – это вектор, модуль которого равен максимальной силе, действующей на единичный элемент тока:

$$B = \frac{F_{\max}}{Idl}.$$

Для графического задания магнитного поля используют линии магнитной индукции – линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{B} . Направление линий магнитной индукции вокруг проводника с током определяется правилом правого винта: головка винта, ввинчиваемого по направлению тока, вращается в направлении линий магнитной индукции. Линии магнитной всегда замкнуты и охватывают проводники с током.

Единицей измерения магнитной индукции является 1 Тл (один тесла).

Вектор магнитной индукции \vec{B} характеризует результирующее магнитное поле, создаваемое движущимся зарядом (или током) и намагничиванием окружающей его среды.

Для описания магнитного поля наряду с магнитной индукцией используют другую физическую величину – напряженность магнитного поля, которая определяется только движущимися зарядами (токами) независимо от среды.

Для однородной изотропной среды вектор магнитной индукции связан с вектором напряженности \vec{H} соотношением:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}, \quad (3.45)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость среды.

3.5.2. Закон Био -Савара-Лапласа.

Магнитное поле постоянного тока

Вектор магнитной индукции подчиняется принципу суперпозиции: если магнитное поле создается несколькими проводниками с током, то индукция результирующего поля равна векторной сумме индукций полей, создаваемых каждым проводником $\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i$.

Точно также для одного проводника с током индукция \vec{B} есть векторная сумма элементарных индукций $d\vec{B}$, создаваемых отдельными участками провода. Вектор магнитной индукции в каждой точке можно определить по *закону Био-Савара-Лапласа*, который формулируется следующим образом:

Элемент провода dl , по которому течет ток I , создает в некоторой точке магнитное поле, индукция которого $d\vec{B}$ прямо пропорциональна силе тока, длине проводника и обратно пропорциональна квадрату расстояния r от элемента тока до точки наблюдения:

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I dl}{r^2} \sin \alpha, \quad (3.46)$$

где α – угол между направлением вектора в точку наблюдения и направлением элемента тока dl (рис.3.7).

Вектор $d\vec{B}$ перпендикулярен к плоскости, содержащей элемент проводника с током dl и радиус-вектор \vec{r} .

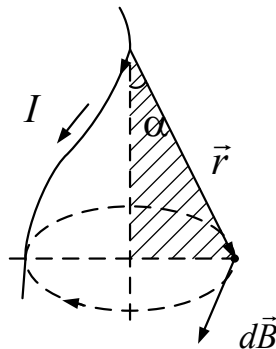


Рис. 3.7

Направление $d\vec{B}$ определяется правилом правого винта.

Вектор магнитной индукции поля, создаваемого проводником с током в данной точке, вычисляется согласно принципу суперпозиции

$$B = \frac{\mu \mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dl \sin \alpha}{r^2}. \quad (3.47)$$

Формула (3.47) позволяет рассчитать индукцию магнитного поля, создаваемого произвольным распределением постоянных токов.

Вычислим магнитное поле в центре кругового тока. Пусть ток I идет по проводу в виде окружности радиуса R (рис. 3.8).

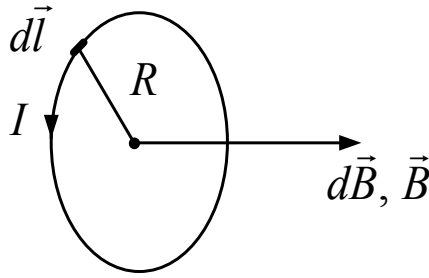


Рис. 3.8

Векторы $d\vec{B}$ всех элементов кольцевого провода направлены перпендикулярно плоскости круга. Поэтому суммарная индукция магнитного поля \vec{B} направлена в ту же сторону, а её модуль равен сумме всех dB . Любой элемент кругового контура находится на одном и том же расстоянии $r = R$ от центра кругового тока, а его направление образует прямой угол $\alpha = \frac{\pi}{2}$ с направлением на точку наблюдения. Поэтому

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I}{R^2} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 \mu I}{2R}.$$

Таким образом, магнитная индукция поля в центре кругового проводника с током

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}. \quad (3.48)$$

Аналогично вычисляется индукция магнитного поля прямолинейного проводника с током.

Линии магнитной индукции представляют собой систему охватывающих провод концентрических окружностей (рис. 3.9).

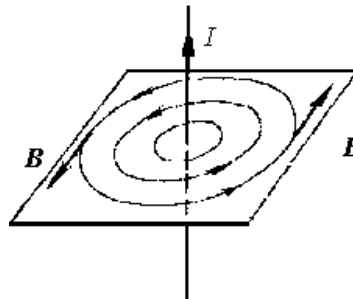


Рис. 3.9

В некоторой точке на расстоянии R от проводника с током индукция магнитного поля вычисляется по формуле:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (3.49)$$

где α_1, α_2 – углы между направлением тока и векторов \vec{r} от концов проводника в точку наблюдения.

Для бесконечно длинного проводника $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi$, следовательно, магнитная индукция поля такого проводника с током равна

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi R}. \quad (3.50)$$

3.5.3. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции

Для расчёта магнитных полей большим количеством проводников с током систем используют теорему о циркуляции вектора \vec{B} .

Рассмотрим произвольный замкнутый контур L и зададим на нем направление обхода. Обозначим через B_l проекцию вектора \vec{B} на направление элемента контура $d\vec{l}$ (рис. 3.10).

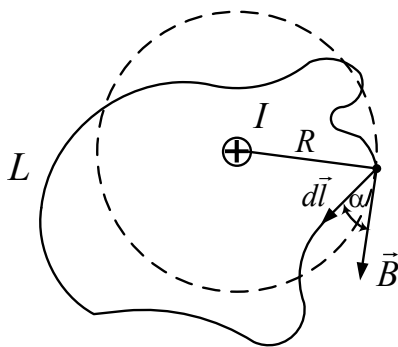


Рис. 3.10

Интеграл $\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl$ называется циркуляцией вектора \vec{B} по заданному замкнутому контуру. Здесь $B_l = B \cos \alpha$, где α – угол между векторами \vec{B} и $d\vec{l}$.

Теорема о циркуляции вектора \vec{B} (закон полного тока).

Циркуляция вектора \vec{B} по произвольному замкнутому контуру L равна произведению $\mu_0 \mu$ на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром

$$\oint_L B_l dl = \mu \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k . \quad (3.51)$$

Положительным считается ток, направление которого образует с направлением обхода контура правовинтовую систему.

Существенным моментом в этой теореме является то, что контур L выбирается произвольной формы, следовательно, его можно выбрать так, чтобы интеграл $\int_L \vec{B} d\vec{l}$ вычислялся, как можно, проще.

Применяя теорему о циркуляции вектора \vec{B} к расчету поля, создаваемого соленоидом, с числом витков на единицу длины n , по которому течет ток I , получим:

$$B = \mu_0 \mu I n .$$

3.5.4. Частицы и токи в магнитном поле.

Частицы в магнитном поле. Сила Лоренца

Магнитное поле возникает вокруг заряженных частиц, движущихся относительно выбранной системы отсчета. С другой стороны обнаружить магнитное поле можно по поведению в нем движущихся заряженных частиц и проводников с током. Опыт показывает, что сила, действующая на заряженную частицу в магнитном поле, зависит от её заряда, скорости и индукции магнитного поля \vec{B} . Она называется силой Лоренца. Направлена сила Лоренца перпендикулярно \vec{v} и \vec{B} , т.е. определяется их векторным произведением

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \cdot \vec{B}], \quad F_L = qvB \sin \alpha . \quad (3.52)$$

Взаимная ориентация трех векторов \vec{F}_L , \vec{v} и \vec{B} , входящих в (3.52), показана на рис. 3.11 для различных по знаку зарядов.

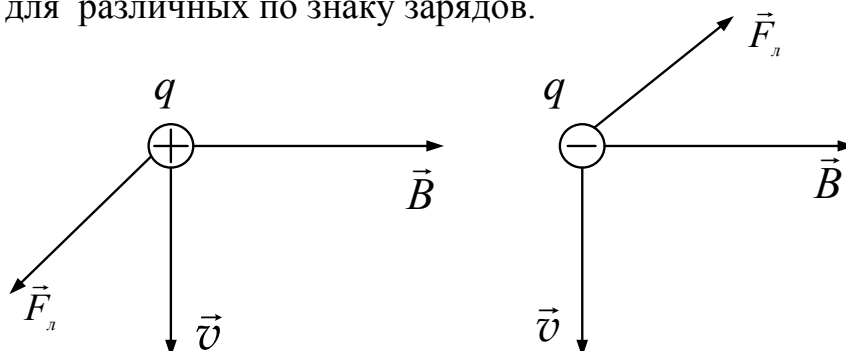


Рис. 3.11

Так как магнитная сила всегда перпендикулярна скорости, то её работа равна нулю, т.е. энергия движущейся частицы не изменяется, изменяется лишь направление движения.

Если $\vec{v} \perp \vec{B}$, то частица движется по окружности, радиус которой можно найти по второму закону Ньютона:

$$ma_n = qvB, \quad \frac{mv^2}{r} = qvB, \quad r = \frac{mv}{qB}. \quad (3.53)$$

Если вектор скорости \vec{v} направлен под углом α к вектору \vec{B} , то частица движется по спирали.

Проводники с током в магнитном поле. Сила Ампера

Результирующая всех магнитных сил, действующих на отдельные носители тока в проводнике с током, называется **силой Ампера**.

В векторной форме закон Ампера имеет вид

$$\vec{F}_A = I[d\vec{l} \cdot \vec{B}]. \quad (3.54)$$

Направление силы $d\vec{F}$ можно найти по правилу левой руки: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в неё входили линии магнитной индукции, а четыре вытянутых пальца расположить по направлению электрического тока в проводнике, то отставленный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник. Можно пользоваться правилом векторного произведения векторов.

Поток вектора магнитной индукции

Потоком $d\Phi$ вектора магнитной индукции (магнитным потоком) через площадку dS называется количество линий вектора \vec{B} , пересекающих эту площадку. Для однородного поля поток вычисляется по формуле

$$d\Phi = B dS \cos \alpha, \text{ или } d\Phi = B_n dS \quad (3.55)$$

где $B_n = B \cos \alpha$ – проекция вектора \vec{B} на направление нормали к площадке dS .

Полный магнитный поток через произвольную поверхность S равен

$$\Phi = \int_S B_n dS. \quad (3.56)$$

В СИ магнитный поток измеряется в веберах (Вб).

Если поверхность замкнута, то

$$\oint_S B_n dS = 0, \quad (3.57)$$

т.е. поток вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю. Это означает, что линии магнитной индукции замкнутые.

При движении проводника с током в магнитном поле сила Ампера совершает работу

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1) \quad (3.58)$$

Отметим, что работа сил Ампера по перемещению проводника с током в магнитном поле совершается за счет энергии источника тока.

Если в магнитном поле движется замкнутый контур с током, то работа, совершающаяся при его перемещении, тоже равна произведению силы тока I на изменение магнитного потока. При конечном перемещении

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1), \quad (3.59)$$

где Φ_2 — магнитный поток сквозь контур в конце перемещения; Φ_1 — поток сквозь контур в начале перемещения, при этом считается, что сила тока в контуре при его перемещении поддерживается постоянной.

3.6. Электромагнитная индукция

3.6.1. Явление и основной закон электромагнитной индукции

Открытое Фарадеем явление электромагнитной индукции состоит в том, что в любом замкнутом контуре при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает индукционный ток. Причиной возникновения тока является ЭДС электромагнитной индукции.

ЭДС электромагнитной индукции не зависит от способа изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную контуром и пропорциональна скорости изменения магнитного потока.

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.60)$$

Формула (3.60) представляет собой основной закон электромагнитной индукции. Знак минус в формуле (3.60) отражает правило Ленца, согласно которому направление индукционного тока всегда таково, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающему индукционный ток.

Все современные мощные генераторы электрического тока основаны на явлении электромагнитной индукции. Рассмотрим простейший и в то же время наиболее часто встречающийся на практике случай вращения плоского витка в однородном магнитном поле, когда ось вращения лежит в плоскости витка.

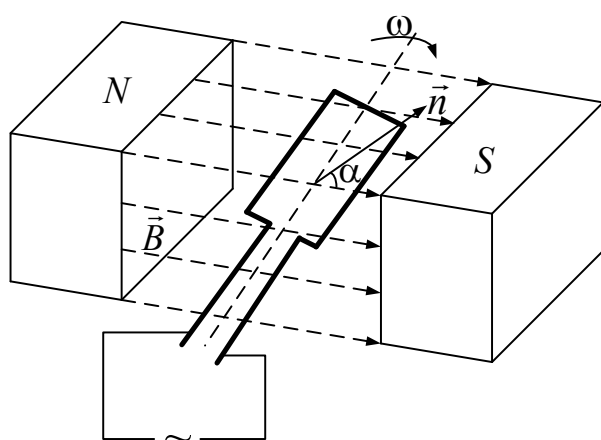


Рис. 3.12

Если α – угол между нормалью \vec{n} и индукцией поля \vec{B} , то поток через виток равен $\Phi = BS \cos \alpha = \Phi_0 \cos \alpha$, где S – площадь витка, а Φ_0 – максимальное значение потока при $\alpha = 0$ (рис.3.12)

При равномерном вращении витка с угловой скоростью ω угол $\alpha = \omega t + \alpha_0$. ЭДС индукции, возникающая в витке

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = \Phi_0 \omega \sin(\omega t + \alpha_0) = \varepsilon \sin(\omega t + \alpha_0). \quad (3.61)$$

Формула (3.61) определяет мгновенное значение синусоидальной переменной ЭДС, возникающей при вращении рамки в однородном магнитном поле. Если имеется не один, а N витков, по амплитуде ε будет в N раз больше.

При замыкании цепи, содержащей источник постоянного тока, ток достигает своего установившегося значения не сразу, а при размыкании цепи не может мгновенно исчезнуть.

Используя закон электромагнитной индукции (3.60) для ЭДС самоиндукции, получим выражение:

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt}. \quad (3.62)$$

Коэффициент пропорциональности L называется *индуктивностью контура* или *коэффициентом самоиндукции*.

Индуктивность контура L зависит от его размеров и формы, а также от магнитных свойств среды, в которую он помещен.

Явление возникновения индукционного тока в контуре при изменении сцепленного с ним магнитного потока, созданного другим контуром, называется **взаимной индукцией**.

Согласно основному закону электромагнитной индукции

$$\mathcal{E}_1 = \frac{d\Phi_{21}}{dt} - L_{12} \frac{dI_2}{dt}, \quad \mathcal{E}_2 = -L_{12} \frac{d\Phi_{12}}{dt} - L_{12} \frac{dI_1}{dt}, \quad (3.63)$$

где \mathcal{E}_1 – ЭДС индукции, возникающая в контуре 1, а \mathcal{E}_2 – ЭДС индукции в контуре 2.

На явлении взаимной индукции основано действие трансформатора, индукционной катушки (например, в системе зажигания двигателей внутреннего сгорания).

3.6.2. Энергия магнитного поля

При протекании через контур тока I контур будет пронизывать магнитный поток.

При увеличении тока до некоторого значения I энергия контура с током будет равна

$$W = \int_0^I LI dI = \frac{LI^2}{2}. \quad (3.64)$$

Эта энергия локализована в магнитном поле вокруг проводника. Энергия магнитного поля в выделенном объёме пространства V выражается через характеристики магнитного поля следующим образом:

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} V = \frac{BH}{2} V. \quad (3.65)$$

Энергия единицы объема поля или объемная плотность энергии магнитного поля равна

$$W = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2} = \frac{BH}{2}. \quad (3.66)$$

3.7. Уравнения Максвелла. Заключение

Из основного закона электромагнитной индукции и определения понятия ЭДС следует

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}. \quad (3.67)$$

Символ частной производной подчеркивает то, что интеграл $\int_s \vec{B} d\vec{S}$ является функцией только времени. Выражение (3.67) представляет собой уравнение Максвелла. Оно утверждает, что **переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле**.

Переменное электрическое поле называют током смещения, в отличие от токов проводимости.

Плотность тока смещения пропорциональна скорости изменения напряжённости электрического поля или вектора электрического смещения по времени, то есть скорости его изменения в данной точке поля:

$$\vec{j}_{\text{см}} = \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{или} \quad \vec{j}_{\text{см}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (3.68)$$

Опыт показывает, ток смещения, как и ток проводимости, создаёт вокруг себя магнитное поле.

Максвелл обобщил теорему о циркуляции вектора \vec{H} , введя в сумму токов, охватываемых контуром, токи смещения.

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_0\mu \sum I + \mu_0\mu I_{\text{см}}. \quad (3.69)$$

Обобщенная теорема о циркуляции вектора \vec{H} запишется в виде

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \int_s (\vec{j}_{\text{np}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) d\vec{S}. \quad (3.70)$$

Третье уравнение Максвелла выражает теорему Гаусса-Остроградского для потока вектора электрического смещения \vec{D} сквозь произвольную замкнутую поверхность, охватывающую суммарный заряд q

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0}.$$

Четвертое уравнение Максвелла представляет собой теорему Гаусса для магнитного потока сквозь произвольную замкнутую поверхность S

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

Поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю.

К рассмотренной системе четырех уравнений Максвелла для электромагнитного поля следует присоединить соотношения, с помощью которых вводятся электрические характеристики веществ ϵ , μ , γ .

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}, \quad j_{\text{пр}} = \gamma \vec{E}.$$

где μ и ϵ – магнитная и диэлектрическая проницаемости вещества, γ – удельная проводимость вещества.

Уравнения Максвелла являются обобщением законов электромагнетизма. Из системы уравнений следует существование электромагнитного поля, электромагнитных волн, скорость распространения которых оказалась равной скорости света. Это доказывает, что свет это электромагнитные волны.

Заключение

Вы изучили законы механики, термодинамики и электромагнетизма. Знание теоретического материала этих разделов помогает изучать и эксплуатировать большое количество современных приборов, определять их техническую и экономическую эффективность.

3.3. ГЛОССАРИЙ

АБСОЛЮТНО ТВЕРДОЕ ТЕЛО – тело (система), взаимное положение любых точек которого не изменяется, в каких бы процессах оно не участвовало.

АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЕ – термодинамическое состояние вещества, сильно отличающееся по своим физическим свойствам от других агрегатных состояний этого же вещества.

АМПЕР (обозначение: А) – единица измерения силы электрического тока в системе СИ. Ампер равен силе такого постоянного тока, который, будучи пущен по двум прямым параллельным проводникам бесконечной длины и незначительным поперечным сечением, помещённым на расстоянии в 1 метр друг от друга в вакууме, создавал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н/м.

ВЯЗКОСТЬ – внутреннее трение, свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Различают динамическую вязкость (единицы измерения Пуаз, Па·с) и кинематическую вязкость.

ГАЗ (иначе – газообразное состояние) – агрегатное состояние вещества, характеризующееся очень слабыми связями между составляющими его частицами (молекулами, атомами или ионами), а также их большей подвижностью.

ДАВЛЕНИЕ в физике – отношение силы, нормальной к поверхности взаимодействия между телами, к площади этой поверхности или в виде формулы $P = F/S$.

ДИНАМИКА – раздел механики, в котором рассматривается связь параметров движения с причинами, их вызывающими (силами, моментами сил).

ДИЭЛЕКТРИК – вещество, обладающее низкой удельной электрической проводимостью. Диэлектрики практически не проводят электрический ток, способны поляризоваться в электрическом поле.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ, относительная диэлектрическая проницаемость – физическая величина, показывающая, во сколько

раз напряженность электрического поля внутри однородного диэлектрика меньше напряженности поля в вакууме.

ДИФФУЗИЯ – процесс переноса материи или энергии из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией. Самым известным примером диффузии является перемешивание газов или жидкостей.

ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ – математическая модель газа, в которой предполагается, что потенциальной энергией взаимодействия молекул можно пренебречь по сравнению с их кинетической энергией. Между молекулами не действуют силы притяжения или отталкивания, соударения частиц между собой и со стенками сосуда абсолютно упруги.

ИЗОПРОЦЕССЫ – термодинамические процессы, во время которых одна из физических величин – параметров состояния: давление, объём или температура – остаётся неизменной.

ИМПУЛЬС – произведение массы тела на его скорость (то же, что и *количество движения*).

ИНДУКТИВНОСТЬ – физическая величина, характеризующая свойства проводника. Индуктивность численно равна магнитному потоку при силе тока в проводнике в 1А. Индуктивность зависит от размеров и формы контура, а также от магнитной проницаемости окружающей среды.

ИНЕРТНАЯ МАССА есть мера инерции объекта, она характеризует сопротивление изменению состояния движения, когда к телу приложена внешняя сила.

ИНЕРЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА (ИСО) – система отсчёта, в которой справедлив закон инерции: любое тело, на которое не действуют внешние силы, находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения.

КОНДЕНСАТОР – система из двух и более электродов (обкладок), разделённых диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок. Такая система обладает взаимной ёмкостью и способна сохранять электрический заряд.

МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ – векторная физическая величина, численно равная силе, с которой магнитное поле действует на единицу длины прямолинейного проводника с током, равным единице силы тока, расположенного перпендикулярно направлению поля.

МАССА – физическая величина, характеризующая меру инертности тела при поступательном движении.

МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА – объект, размерами которого при решении задачи можно пренебречь.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА – раздел физики, в котором изучаются физические свойства тел на основе рассмотрения их молекулярного строения.

МОЛЬ (обозначение – моль, mol) – единица измерения количества вещества в СИ. Соответствует количеству вещества, содержащему столько структурных единиц (атомов, молекул, ионов, электронов или любых других частиц), сколько содержится атомов в 0,012 кг изотопа ^{12}C .

МОМЕНТ ИМПУЛЬСА – динамическая характеристика вращающегося тела, равная произведению момента инерции тела относительно данной оси вращения и угловой скорости.

МОМЕНТ СИЛЫ (крутящий момент) – физическая величина, характеризующая вращательное действие силы на твёрдое тело.

ОРТ – вектор, по модулю равный единице и направленный вдоль осей координат.

ПАРЦИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ – давление, которое имел бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал объём, равный объёму смеси при той же температуре.

ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ – физическая величина, равная отношению энергии электрического поля в некотором объеме к величине этого объема.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКА, диэлектрическая поляризация – смещение положительных и отрицательных связанных зарядов в макрообъёме

диэлектрика в противоположные стороны, что приводит к появлению поверхностных связанных зарядов.

ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ – энергетическая характеристика электрического поля; скалярная величина, равная отношению потенциальной энергии заряда в данной точке поля к величине этого заряда.

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ в электростатике утверждает, что вектор напряжённости (электростатический потенциал), создаваемый в данной точке системой зарядов, есть сумма векторов напряжённостей (потенциалов) отдельных зарядов. Принцип суперпозиции может принимать и иные формулировки, которые полностью эквивалентны приведённой выше.

РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ – электрическая между двумя точками пространства (цепи); равна работе электрического поля по перемещению единичного положительного заряда из одной точки поля в другую.

РАДИУС-ВЕКТОР – вектор, который проводится из начала координат в заданную точку пространства.

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА (специальная теория относительности) – раздел физики, рассматривающий законы механики (законы движения тел и частиц) при скоростях, сравнимых со скоростью света. При скоростях значительно меньших скорости света, переходит в классическую (ньютоновскую) механику.

СИЛА – качественная и количественная мера взаимодействия тел. Результатом действия силы является деформация тел или изменение скорости.

СИЛА ЛОРЕНЦА – сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле.

СИЛОВЫЕ ЛИНИИ – воображаемые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряжённости электрического поля в этой точке. Силовые линии электрического поля начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах. Силовые линии электрического поля не пересекаются.

СКОРОСТЬ – быстрота перемещения объекта в пространстве по траектории.

ТЕМПЕРАТУРА – физическая величина, характеризующая интенсивность хаотического движения молекул. Абсолютная температура измеряется в Кельвинах.

ТЕОРЕМА ГАУССА – утверждение: поток напряженности электрического поля в вакууме через любую замкнутую поверхность пропорционален полному заряду, находящемуся внутри этой поверхности.

ТЕСЛА (обозначение Тл) – единица измерения магнитной индукции в системе СИ.

ТОК – направленное движение заряженных частиц.

ТОК СМЕЩЕНИЯ – источник магнитного поля, обусловленный изменением напряженности электрического поля со временем.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ тела – физическая величина, определяющая отношение бесконечно малого количества теплоты, полученного телом, к соответствующему приращению его температуры. Единица измерения теплоёмкости в системе СИ – Дж/К.

ТЕРМОДИНАМИКА – наука, изучающая внутреннее состояние макроскопических систем на основе законов взаимопреобразования и передачи энергии.

ТРАЕКТОРИЯ – кривая, по которой перемещается объект в пространстве.

УСКОРЕНИЕ – кинематическая характеристика, показывающая изменение вектора скорости за единицу времени.

ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ – поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковое значение.

ЭНТРОПИЯ в химии и термодинамике является функцией, определяющей вероятность состояния термодинамической системы;

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЁМКОСТЬ – характеристика проводника, определяющая способность проводника накапливать электрический заряд.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ – скалярная величина, входящая в выражение ряда законов электрического поля при записи их в СИ. Электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,854\,187\,820 \times 10^{-12}$ Ф/м.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД – скалярная величина, характеризующая электромагнитное взаимодействие.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ – особая форма существования материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между покоящимися или движущимися электрическими зарядами.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ – мера способности тел препятствовать прохождению через них электрического тока.

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА (ЭДС) – физическая величина, характеризующая работу сторонних сил в источниках постоянного или переменного тока. В замкнутом проводящем контуре ЭДС равна работе этих сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль контура.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ – возникновение электродвижущей силы (ЭДС) в проводнике, находящемся в изменяющемся магнитном поле или благодаря движению проводника относительно неподвижного магнитного поля.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ – особый вид материи, посредством которого осуществляются электромагнитное взаимодействие.

ЭЛЕКТРОСТАТИКА – раздел электродинамики, изучающий поле неподвижных зарядов и их взаимодействие.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ – электрическое поле, созданное неподвижными электрическими зарядами при отсутствии в них электрических токов.

4. БЛОК КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Методические указания к выполнению контрольных работ

В процессе изучения первой части дисциплины “Физика” студенты выполняют две контрольные работы: контрольные работы № 1 и № 2. Решение физических задач является необходимой практической основой изучения дисциплины “Физика”. При решении задач студент должен самостоятельно осуществить ряд мыслительных операций, опираясь на имеющиеся у него знания и умения. Контрольные работы позволяют проверить степень усвоения студентами основных разделов теоретического курса.

4.1.1. Общие требования к оформлению контрольных работ

При оформлении контрольных работ условия задач в контрольных работах переписываются полностью, без сокращений. Решения задач должны сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями с обязательным использованием рисунков, выполненных чертежными инструментами. Для замечаний преподавателя на страницах тетради оставляются поля. В конце каждой контрольной работы необходимо указать, каким учебным пособием пользовался студент (название учебного пособия, автор, год издания).

Решение задач рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1. Ввести буквенные обозначения всех используемых физических величин.
2. Под рубрикой "Дано" кратко записать условие задачи с переводом значений всех величин в одну систему единиц – СИ.
3. Сделать (если это необходимо) чертеж, поясняющий содержание задачи и ход решения.
4. Указать физические законы, на которых базируется решение задачи, и обосновать возможность их использования.

5. Составить уравнение или систему уравнений, решая которую можно найти искомые величины.

6. Решить уравнение и получить в общем виде расчетную формулу.

7. Произвести вычисления в единицах СИ. Для этого подставить в расчетную формулу числовые значения величин, заданные в условии задачи, и выполнить вычисления (с точностью не более 2-3 значащих цифр).

В каждой контрольной работе следует решить восемь задач. Номера задач определяются по таблицам в соответствии с номером своего варианта. Номер варианта соответствует последней цифре шифра студента.

Контрольные работы выполняются в школьной тетради, на обложке которой приводятся сведения о студенте (фамилия, имя, отчество, факультет, шифр, номер специальности), а также номер контрольной работы, номер варианта и номера всех задач контрольной работы.

Решённую контрольную работу студент должен сдать на проверку преподавателю не позднее, чем за неделю до экзамена. Зачет по каждой контрольной работе принимается преподавателем в процессе собеседования по правильно решенной и прорецензированной контрольной работе.

Студенты, обучающиеся в системе ДОТ, помещают копию решённой контрольной работы на учебном сайте ДОТ. На экзамене студент предъявляет преподавателю распечатку результатов проверки контрольной работы и работу над ошибками.

4.1.2. Методические указания к выполнению контрольной работы №1

В контрольную работу № 1 включены задачи по разделам: "Физические основы механики", "Молекулярная физика", "Основы термодинамики".

Задачи 101...150 относятся к разделу "Физические основы механики" на следующие темы: "Кинематика поступательного и вращательного движения" (101...110); "Динамика поступательного движения" (111...120); "Законы со-

хранения импульса и механической энергии" (121...140); "Динамика вращательного движения твердого тела" (141...150). На разделы "Молекулярная физика" и "Основы термодинамики" даны задачи 151...180. Для решения задач на эти темы необходимо усвоить основные понятия, процессы с идеальным газом, уравнение состояния идеального газа (задачи 151...159), понятие внутренней энергии, основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов (160-164), I начало термодинамики, теплоемкость идеального газа, применение I начала к различным процессам (165...173); II начало термодинамики, принцип действия тепловой и холодильной машин (177...180).

Таблица 4.1.1.

Вариант	Номера задач							
0	101	111	121	131	141	151	161	171
1	102	112	122	132	142	152	162	172
2	103	113	123	133	143	153	163	173
3	104	114	124	134	144	154	164	174
4	105	115	125	135	145	155	165	175
5	106	116	126	136	146	156	166	176
6	107	117	127	137	147	157	167	177
7	108	118	128	138	148	158	168	178
8	109	119	129	139	149	159	169	179
9	110	120	130	140	150	160	170	180

Для решения этих задач необходимо ознакомиться с конкретными физическими понятиями, законами и формулами данной темы, разобрать примеры решения задач.

4.1.3. Примеры решения задач

Задача 1.1

Две материальные точки движутся по прямой согласно уравнениям: $x_1 = A_1 + B_1 t + C_1 t^2$ и $x_2 = A_2 + B_2 t + C_2 t^2$, где $A_1 = 10$ м; $B_1 = 4$ м/с; $C_1 = -2$ м/с²; $A_2 = 3$ м; $B_2 = 2$ м/с; $C_2 = 0,2$ м/с². В какой момент времени скорости этих точек будут одинаковы? Найти ускорения этих точек в момент времени 3с.

Дано:

$$x_1 = A_1 + B_1 t + C_1 t^2;$$

$$x_2 = A_2 + B_2 t + C_2 t^2.$$

$$A_1 = 10 \text{ м}; B_1 = 4 \text{ м/с}; C_1 = -2 \text{ м/с}^2.$$

$$A_2 = 3 \text{ м}; B_2 = 2 \text{ м/с}; C_2 = 0,2 \text{ м/с}^2.$$

$$t = ? \text{ (при } v_1 = v_2)$$

$$a_1 = ? \quad a_2 = ?$$

Решение. Так как требуется найти скорость и ускорение в определенный момент времени ($t = 2 \text{ с}$), то это значит, что нужно определить мгновенные значения скоростей и ускорений.

Мгновенная скорость v есть первая производная от координаты по времени. Получим выражения для v_1 и v_2 :

$$v_1 = \frac{dx_1}{dt} = B_1 + 2C_1 t;$$

$$v_2 = \frac{dx_2}{dt} = B_2 + 2C_2 t.$$

Определим момент времени, в который $v_1 = v_2$, для чего приравняем правые части выражений для скоростей:

$$B_1 + 2C_1 t = B_2 + 2C_2 t,$$

откуда

$$t = \frac{B_1 - B_2}{2(C_1 - C_2)}.$$

Подставляя числовые значения в формулу, получим:

$$t = \frac{4 - 2}{2 \cdot (0,2 - 2)} = 0,4 \text{ с}.$$

Ускорение точек найдем, взяв первую производную от скорости по времени:

$$a_1 = \frac{dv_1}{dt} = 2C_1;$$

$$a_2 = \frac{dv_2}{dt} = 2C_2.$$

Из выражений видно, что движение обеих точек происходит с постоянным ускорением:

$$a_1 = 2C_1 = 2 \cdot (-2) \text{ м/с}^2 = -4 \text{ м/с}^2,$$

$$a_2 = 2C_2 = 2 \cdot (0,2) \text{ м/с}^2 = 0,4 \text{ м/с}^2.$$

Задача 1.2

Тело вращается вокруг неподвижной оси по закону

$$\varphi = A + Bt + Ct^2,$$

где $A = 12$ рад; $B = 18$ рад/с; $C = -4$ рад/с².

Определить нормальное и тангенциальное ускорение точки, расположенной на расстоянии 0,2 м от оси вращения в момент времени 2с.

Дано:

$$\varphi = A + Bt + Ct^2$$

$$A = 12 \text{ рад}; B = 18 \text{ рад/с}; C = -4 \text{ рад/с}^2$$

$$t = 2 \text{ с}, R = 0,2 \text{ м}$$

$$a_n = ?$$

$$a_\tau = ?$$

Решение. Тангенциальное и нормальное ускорения точки, вращающегося тела выражаются формулами:

$$a_\tau = \beta r,$$

$$a_n = \omega^2 r.$$

где ω – угловая скорость тела; β – угловое ускорение тела.

Угловую скорость ω найдем, взяв первую производную от угла поворота по времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = B + 2Ct_1.$$

В момент $t = 2$ с угловая скорость равна

$$\omega = [18 + 2 \cdot (-4) \cdot 2] \text{ рад/с} = 2 \text{ рад/с}.$$

Угловое ускорение найдем, взяв производную от угловой скорости по времени:

$$\beta = \frac{d\omega}{dt} = 2C = -8 \text{ рад/с}^2.$$

Подставляя значения β , ω , r в формулу (1), получим:

$$a_{\tau} = (-8) \cdot 0,2 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} = -1,6 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$$

$$a_n = 2^2 \cdot 0,2 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} = 0,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}.$$

Задача 1.3.

Поезд массой 4000 т идет со скоростью 36 км/ч. Перед остановкой поезд начинает тормозить. Сила торможения равна $2 \cdot 10^5$ Н. Какое расстояние пройдет поезд за 1 минуту после начала торможения?

Дано:

$$V_0 = 36 \text{ км/ч}$$

$$F = 2 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$t = 1 \text{ мин}$$

$$S = ?$$

Решение. После начала торможения поезд стал двигаться равнозамедленно, следовательно, путь, который прошел поезд, выражается формулой:

$$S = V_0 t - \frac{at^2}{2},$$

где V_0 – начальная скорость движения поезда. На поезд действует при этом только одна сила – сила торможения. Эта сила сообщает поезду отрицательное ускорение. По второму закону Ньютона это ускорение равно

$$a = \frac{F}{m}.$$

Подставим это выражение в формулу пути и получим

$$S = V_0 t - \frac{F t^2}{2m}.$$

Подставляем числовые значения V_0 , F , t ; проведем вычисления S . Предварительно все данные запишем в системе СИ:

$$m = 4000 \text{ т} = 4 \cdot 10^6 \text{ кг},$$

$$V_0 = 36 \text{ км/ч} = 10 \text{ м/с},$$

$$F = 2 \cdot 10^5 \text{ Н},$$

$$t = 1 \text{ мин} = 60 \text{ с}.$$

Тогда

$$S = 10 \text{ м/с} \cdot 60 \text{ с} - \frac{2 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot (3,6 \cdot 10^3)^2 \text{ с}^2}{2 \cdot 4 \cdot 10^6 \text{ кг}} = 510 \text{ м}.$$

Задача 1.4

Тележка с песком массой 40 кг движется горизонтально со скоростью 5 м/с. Камень массой 10 кг попадает в песок и движется вместе с тележкой. Найти скорость тележки после попадания камня: а) падающего по вертикали; б) летящего горизонтально навстречу тележке со скоростью 10 м/с.

Дано:

$$m_1 = 40 \text{ кг}$$

$$v_1 = 5 \text{ м/с}$$

$$m_2 = 10 \text{ кг}$$

$$\text{а) } v_2 = 0; \text{ б) } v_2 = 10 \text{ м/с}$$

$$u = ?$$

Решение. Рассмотрим систему, состоящую из тележки и камня. Внешняя сила (сила тяжести) направлена вертикально, поэтому по отношению к вертикальному движению система незамкнута, и закон сохранения импульса неприменим. В горизонтальном направлении внешние силы отсутствуют, и закон со-

хранения импульса выполняется в проекции на направление движения. В качестве положительного направления оси X примем направление движения тележки.

После вертикального падения камня скорость системы уменьшится только в связи с увеличением массы. Закон сохранения импульса для данного случая имеет вид

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) u ,$$

откуда

$$u = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1 .$$

После подстановки числовых значений в выражение, получим:

$$u = \frac{40 \cdot 5}{40 + 10} = 4 \text{ мм} .$$

Запишем закон сохранения импульса в проекции на ось X для случая, когда камень летит горизонтально, со скоростью $v_2 = 10$ м/с и застревает в песке:

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = (m_1 + m_2) u ,$$

откуда

$$u = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2} .$$

Произведем вычисления величины u :

$$u = \frac{40 \cdot 5 - 10 \cdot 10}{40 + 40} \text{ м/с} = 2 \text{ мм} .$$

Задача 1.5

В мешок с песком массой 4 кг, висящий на длинной нерастяжимой нити, попадает пуля, летящая горизонтально со скоростью 400 м/с, и застревает в нем. Масса пули 10 г. Найти высоту, на которую отклонится мешок с песком.

Дано:

$$m_1 = 4 \text{ кг}$$

$$v_1 = 0$$

$$m_2 = 10 \text{ г} = 10^{-2} \text{ кг}$$

$$v_2 = 400 \text{ м/с}$$

$$h = ?$$

Решение. В горизонтальном направлении на пулю и мешок внешние силы не действуют, поэтому система мешок - пуля может считаться замкнутой.

Тогда закон сохранения импульса в проекции на ось X запишется в виде

$$m_2 v_2 = (m_1 + m_2) u,$$

где u – скорость совместного движения мешка и пули.

Отсюда

$$u = \frac{m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

После того как в мешок попала пуля, оба эти тела движутся вместе, и их кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию.

Согласно закону сохранения энергии

$$\frac{(m_1 + m_2)}{2} u^2 = (m_1 + m_2) g h.$$

Из полученных формул найдём высоту

$$h = \frac{u^2}{2g} = \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) \frac{v_2^2}{2g}.$$

Проведем вычисления по формуле

$$h = \left(\frac{10^{-2}}{4 + 0,01} \right)^2 \cdot \frac{16 \cdot 10^4}{2 \cdot 9,81} \cong 5,1 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 5,1 \text{ см}.$$

Задача 1.6

Маховик в виде диска массой 50 кг и радиусом 20 см вращается с частотой 480 об/м. Затем к поверхности маховика прижали тормозную колодку, под действием которой маховик остановился через 50 с. Определить момент сил торможения.

Дано:

$$m = 50 \text{ кг}$$

$$R = 0,2 \text{ м}$$

$$\Delta t = 50 \text{ с}$$

$$n = 480 \text{ об/мин} = 8 \text{ об/с}$$

$$M = ?$$

Решение. Для определения тормозящего момента M используем основное уравнение динамики вращательного движения в виде

$$M = \frac{\Delta L}{\Delta t},$$

где $L = J\omega$ – момент количества движения маховика; $J = \frac{mR^2}{2}$ – его момент инерции.

Тогда $\Delta L = J\Delta\omega$ – изменение момента количества движения маховика за время Δt .

$$\Delta L = J\Delta\omega = J(\omega_2 - \omega_1) = -J\omega_1,$$

где начальная угловая скорость маховика $\omega_1 = 2\pi n$, а конечная $\omega_2 = 0$.

Для момента силы получим:

$$M = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{J \cdot 1\pi n}{\Delta t} = \frac{mR^2 \cdot 2\pi n}{2 \cdot \Delta t} = \frac{mR^2 \cdot \pi n}{\Delta t}.$$

В результате вычислений по формуле получим:

$$M = \frac{mR^2 \cdot \pi n}{\Delta t} = \frac{50 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 3,14 \cdot 8}{50} = 1,05 \text{ Н}.$$

Задача 1.7

Диск массой 5 кг катится без скольжения по горизонтальной плоскости со скоростью 2 м/с. Найти кинетическую энергию диска.

Дано:

$$m = 5 \text{ кг}$$

$$v = 2 \text{ м/с}$$

$$E_k = ?$$

Решение. Кинетическая энергия диска складывается из кинетических энергий поступательного и вращательного движений, т.е.

$$E_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2},$$

где момент инерции диска

$$J = \frac{mR^2}{2},$$

а угловая скорость $\omega = v/R$. Подставляя значения J и ω в формулу кинетической энергии, получим:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + \frac{mR^2}{2} \cdot \frac{v^2}{2R^2} = \frac{3}{4}mv^2.$$

Вычисления дают:

$$E_k = \frac{3}{4}mv^2 = \frac{3}{4} \cdot 5 \cdot 4 = 15 \text{ Дж.}$$

Задача 2.1

В баллоне объемом 10 л находится гелий под давлением 1 МПа и температуре 300 К. После того как из баллона было выпущено 10 г гелия, температура в баллоне понизилась до 290 К. Определить давление гелия, оставшегося в баллоне.

Дано:

$$V=10 \text{ л} = 10^{-2} \text{ м}^3$$

$$p=1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$$

$$\Delta m = 10 \text{ г} = 10^{-2} \text{ кг}$$

$$T_2 = 290 \text{ К}; \mu = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$p_2 = ?$$

Решение. Применим уравнение Клапейрона-Менделеева

$$p_2 V = \frac{m_2}{\mu} R T_2, \quad (1)$$

где m_2 – масса гелия в баллоне в конечном состоянии; μ – молярная масса гелия; R – универсальная газовая постоянная.

Из этого уравнения выразим давление p_2 :

$$p_2 = \frac{m_2 R T_2}{\mu V}. \quad (2)$$

$$\text{Масса гелия } m_2 = m_1 - \Delta m,$$

где m_1 – масса гелия в начальном состоянии; Δm – масса гелия, взятого из баллона.

Масса гелия m_1 находится из уравнения Клапейрона-Менделеева, записанного для начального состояния:

$$m_1 = \frac{\mu p_1 V}{R T_1}. \quad (3)$$

Окончательно искомое давление с учетом (2) и (3) выразится так:

$$p_2 = \frac{m_2 R T_2}{\mu V} = \frac{(m_1 - \Delta m) R T_2}{\mu V} = \left(\frac{\mu p_1 V}{R T_1} - \Delta m \right) \frac{R T_2}{\mu V} = \frac{T_2}{T_1} \cdot p_1 - \frac{\Delta m}{\mu} \frac{R T_2}{V}. \quad (4)$$

Проведем вычисления по формуле (4)

$$p_2 = \left(\frac{290}{300} \cdot 10^6 - \frac{10^{-2}}{4 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{8,31}{10^{-2}} \cdot 290 \right) \text{ Па} = 0,364 \text{ МПа}.$$

Задача 2.2

Определить среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы углекислого газа при температуре 400 К и полную кинетическую энергию теплового движения всех молекул, находящихся в 20 г углекислого газа. Молярная масса углекислого газа $44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Дано:

$$m = 20 \text{ г} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$$

$$T = 440 \text{ К}$$

$$\mu = 44 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\langle E_{\text{вр}} \rangle = ?; U = ?$$

Решение. Углекислый газ CO_2 – трехатомный, для одной молекулы такого газа 3 степени свободы приходятся на поступательное движение и 3 степени свободы на вращательное движение, всего одна молекула трехатомного газа имеет 6 степеней свободы ($i=6$). На каждую степень свободы приходится одинаковая средняя энергия, равная $\frac{1}{2}kT$, где k – постоянная Больцмана.

Поэтому средняя энергия вращательного движения одной молекулы

$$\langle E_{\text{вр}} \rangle = 3 \cdot \frac{1}{2}kT = \frac{3}{2}kT. \quad (1)$$

Полная кинетическая энергия теплового движения молекул CO_2 – это внутренняя энергия газа. Число молекул, содержащихся в данной массе газа:

$$N = \frac{m}{\mu} N_A, \quad (2)$$

где N_A – постоянная Авогадро.

Поэтому полная кинетическая энергия теплового движения молекул

$$U = N \cdot \frac{i}{2}kT = \frac{m}{\mu} N_A \cdot \frac{6}{2}kT = \frac{m}{\mu} N_A \cdot 3kT. \quad (3)$$

Произведем вычисления по формулам (1) и (3)

$$\langle E_{\text{вр}} \rangle = \frac{3}{2} kT = 1,5 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 4 \cdot 10^2 = 8,28 \cdot 10^{-21} \text{ Дж};$$

$$U = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{44 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 4 \cdot 10^2 = 4531,4 \text{ Дж} = 4,53 \text{ кДж}.$$

Задача 2.3

Разность удельных теплоемкостей некоторого двухатомного газа

$$c_p - c_v = 260 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \text{ Найти молярную массу газа и его удельные теплоемкости.}$$

Дано:

$$c_p - c_v = 260 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$i = 5$$

$$\mu = ?$$

$$c_{p \text{ уд.}} = ?$$

$$c_{v \text{ уд.}} = ?$$

Решение. Известно, что формулы для молярных теплоемкостей газа при постоянном объеме и при постоянном давлении имеют вид

$$\begin{aligned} C_v &= \frac{i}{2} R; \\ C_p &= \frac{i+2}{i} R, \end{aligned} \tag{1}$$

где i – число степеней свободы; R – универсальная газовая постоянная.

С другой стороны, удельная теплоемкость связана с молярной соотношением

$$c = \frac{C}{\mu}. \tag{2}$$

Поэтому

$$c_p - c_v = \frac{C_p - C_v}{\mu} = \Delta c. \quad (3)$$

Тогда

$$\mu = \frac{C_p - C_v}{\Delta c} = \frac{\frac{i+2}{i}R - \frac{i}{2}R}{\Delta c} = \frac{R}{\Delta c}. \quad (4)$$

Удельная теплоемкость при постоянном объеме

$$c_v = \frac{C_v}{\mu} = \frac{iR}{2\mu}, \quad (5)$$

а при постоянном давлении

$$c_p = \frac{C_p}{\mu} = \frac{(i+2)R}{2\mu}. \quad (6)$$

Проведем вычисления по формулам (4), (5), (6):

$$\mu = \frac{R}{\Delta c} = \frac{8,31}{2,60 \cdot 10^2} \approx 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}};$$

$$c_v = \frac{5R}{2\mu} = \frac{2,5 \cdot 8,31}{32 \cdot 10^{-3}} \approx 649 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$c_p = \frac{7R}{2\mu} = \frac{3,5 \cdot 8,31}{32 \cdot 10^{-3}} \approx 909 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Задача 2.4

При изобарическом расширении двухатомного газа была совершена работа 2 кДж. Какое количество теплоты сообщено газу?

Дано:

$$i = 5$$

$$A = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$Q_p = ?$$

Решение. Известно, что при изобарическом процессе совершается работа

$$A = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1) = \frac{m}{\mu} R\Delta T. \quad (1)$$

Следовательно

$$\Delta T = \frac{A}{\frac{m}{\mu} R}. \quad (2)$$

Количество теплоты, подведенное к газу в процессе изобарического расширения, равно

$$Q_p = \frac{m}{\mu} C_p \Delta T, \quad (3)$$

где $C_p = \frac{i+2}{2} R$ – молярная теплоемкость при постоянном давлении. С учетом этого

$$Q_p = \frac{m}{\mu} \frac{i+2}{2} R\Delta T. \quad (4)$$

Подставляя выражение (2) в (4), и учитывая, что для двухатомного газа $i = 5$, получим:

$$Q_p = \frac{i+2}{2} A = \frac{7}{2} A = 3,5 \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 7 \text{ кДж}.$$

Задача 2.5

Холодильная машина работает по обратному циклу Карно, холодильный коэффициент которого равен 250 %. Каков термический КПД тепловой машины, работающей по прямому циклу Карно?

Дано:

$$\eta_x = 250$$

$$\eta = ?$$

Решение. Свяжем КПД прямого и обратного циклов Карно.

Термический КПД любой тепловой машины

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (1)$$

где A – работа, полученная в цикле; Q_1 – количество теплоты, полученное рабочим телом от теплоотдатчика; Q_2 – количество теплоты, отданное теплоприемнику.

В обратном цикле при работе холодильной машины осуществляется передача теплоты от холодного тела горячему за счет совершения работы внешними силами.

Холодильный коэффициент

$$\eta_x = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_1}{|Q_1| - Q_2}. \quad (2)$$

Преобразуем выражение (2):

$$\eta_x = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} = \frac{1}{\frac{Q_1}{Q_2} - 1}. \quad (3)$$

Выразим $\frac{Q_1}{Q_2}$ из формулы (1):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{1}{1 - \eta}. \quad (4)$$

Подставим (4) в (3) и получим выражение, связывающее η и η_x :

$$\eta_x = \frac{1}{\frac{Q_1}{Q_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{1 - \eta} - 1} = \frac{1 - \eta}{\eta}. \quad (5)$$

Теперь вычислим η , воспользовавшись выражением (5):

$$\eta = \frac{1}{1 + \eta_x} = \frac{1}{1 + 2,5} = \frac{1}{3,5} = 0,286.$$

4.1.4. Задание на контрольную работу №1

101. Уравнение движения материальной точки вдоль оси x имеет вид

$$x = A + Bt + Ct^3,$$

где $A = 2$ м; $B = 1$ м/с; $C = -0,5$ м/с³.

Найти координату, скорость и ускорение точки в момент времени 2 с, а также среднюю скорость в промежуток времени от 1 с до 2 с.

102. Уравнение движения материальной точки вдоль оси x имеет вид

$$x = A + Bt + Ct^2 + Dt^3,$$

где $C = 0,15$ м/с²; $D = 0,01$ м/с³.

а) Определить, через сколько времени после начала движения ускорение точки будет равно 1,5 м/с²;

б) Найти среднее ускорение за этот промежуток времени.

103. Прямолинейное движение двух материальных точек описывается уравнениями

$$x_1 = A_1t + B_1t^2 + C_1t^3 \text{ и } x_2 = A_2t + B_2t^2 + C_2t^3,$$

где $A_1 = 4$ м/с; $B_1 = 8$ м/с²; $C_1 = -16$ м/с³; $A_2 = 2$ м/с; $B_2 = -4$ м/с²; $C_2 = 1$ м/с³.

В какой момент времени ускорения этих точек будут одинаковыми? Найти скорости точек в этот момент времени.

104. Зависимость скорости тела от времени при прямолинейном движении дана уравнением $v = 0,3t^2$. Найти величину ускорения тела в момент времени 2 с и путь, пройденный телом за интервал времени от 0 до 2 с.

105. Тело вращается по окружности согласно уравнению $\varphi = A + Bt + Ct^3$, где $A = 2$ рад; $B = 1$ рад/с; $C = -0,5$ рад/с³.

Найти полное ускорение точки, находящейся на расстоянии 1 м от оси вращения для момента времени 2 с, а также среднюю угловую скорость в промежутке времени от 1 до 2 с.

106. Колесо автомобиля, вращающегося с частотой 1200 оборотов в минуту, при торможении стало вращаться равнозамедленно и остановилось через

20 с. Найти угловое ускорение колеса и число оборотов с момента начала торможения до остановки.

107. По дуге окружности радиусом 10 м движется точка. В некоторый момент времени нормальное ускорение точки равно $4,9 \text{ м/с}^2$. Вектор полного ускорения составляет в этот момент угол 60° с вектором нормального ускорения. Определить мгновенную скорость и тангенциальное ускорение точки в этот момент времени.

108. Колесо радиусом 0,3 м вращается согласно уравнению

$$\varphi = 5 - 2t + 0,2t^2.$$

Найти нормальное, тангенциальное и полное ускорение точек на ободу колеса через 5 с после начала движения.

109. Прямолинейное движение материальной точки описывается уравнением:

$$x = A + Bt + Ct^2,$$

где $A = 5 \text{ м}$; $B = -8 \text{ м/с}$; $C = 4 \text{ м/с}^2$.

Считая массу равной 2 кг, определить импульс точки через 2 и 4 с после начала отсчета времени, а также силу, вызвавшую это изменение импульса.

110. Колесо, вращаясь равноускоренно, достигает угловой скорости $2\pi \text{ рад/с}$ через 10 оборотов после начала вращения. Найти угловое ускорение колеса.

111. Автомобиль массой 1,5 т мчится по шоссе со скоростью 150 км/ч. Если отпустить педаль газа, то в течение 5 с его скорость снизится до 120 км/ч. Чему равна средняя сила сопротивления? Какую часть она составляет от веса автомобиля?

112. Найти удлинение буксирного троса, жесткость которого равна 100 кН/м, при буксировке автомобиля массой 2 т с ускорением $0,5 \text{ м/с}^2$. Трением пренебречь.

113. Из орудия вылетает снаряд массой 10 кг со скоростью 600 м/с. Определить среднюю силу давления пороховых газов, если снаряд движется внутри ствола орудия в течение 0,005 с.

114. Шарик массой 100 г упал с высоты 2,5 м на горизонтальную плиту, масса которой много больше массы шарика и отскочил от нее вверх. Считая удар абсолютно упругим, определить импульс, полученный плитой.

115. Пуля, имеющая массу 10 г, подлетает к доске толщиной 4 см со скоростью 600 м/с и, пробив доску вылетает со скоростью 300 м/с. Найти среднюю силу сопротивления доски.

116. На участке дороги, где для автотранспорта установлена предельная скорость 30 км/ч, водитель применил аварийное торможение. Инспектор ГАИ по следу колес обнаружил, что тормозной путь равен 12 м. Нарушил ли водитель правила движения, если коэффициент сопротивления¹ (сухой асфальт) равен 0,6?

117. Космический корабль массой 1000 т начинает подниматься вертикально вверх. Сила тяги его движения равна $2,94 \cdot 10^7$ Н. Определить ускорение корабля.

118. Какой массы состав может везти тепловоз с ускорением $0,1 \text{ м/с}^2$ при коэффициенте сопротивления 0,005, если максимальная сила тяги равна 300 кН?

119. Автомобиль едет по горизонтальной дороге со скоростью 27 м/с. Насколько надо сбавить скорость его движения, если автомобилю предстоит сделать поворот по дуге радиусом 45 м? Коэффициент трения равен 0,5.

120. Трос выдерживает нагрузку 1680 Н. С каким наибольшим ускорением можно поднимать груз массой 100 кг, чтобы трос не разорвался?

121. Человек и тележка движутся навстречу друг другу. Масса тележки 32 кг, масса человека 64 кг. Скорость тележки 1,8 км/ч, скорость человека 5,4 км/ч. Человек прыгает на тележку. С какой скоростью и в каком направлении будет двигаться тележка с человеком?

¹ Коэффициент сопротивления движению учитывает все виды трения (колес о дорогу, в осях и т.д.) и показывает, какую часть от силы нормального давления составляет сила сопротивления.

122. На вагонетку массой 800 кг, движущуюся по горизонтальному пути со скоростью 0,2 м/с, насыпали сверху 200 кг щебня. Насколько при этом изменилась скорость вагонетки?

123. С железнодорожной платформы, движущейся прямолинейно со скоростью 2,5 м/с, в направлении, противоположном ее движению, выстрелили из пушки. Масса платформы с пушкой 20 т, масса снаряда 20 кг, его начальная скорость 600 м/с. Определить скорость платформы после выстрела.

124. Мальчик стоит на абсолютно гладком льду и бросает мяч массой 0,5 кг. С какой скоростью после броска начнет скользить мальчик, если горизонтальная составляющая скорости мяча равна 5 м/с, а масса мальчика равна 20 кг?

125. Снаряд массой 20 кг, летящий горизонтально со скоростью 500 м/с, попадает в платформу с песком массой 10 т, движущуюся со скоростью 36 км/ч навстречу снаряду и застревает в песке. Определить скорость, которую получит платформа от толчка.

126. Какую скорость приобретает ракета массой 0,6 кг, если продукты горения массой $1,5 \cdot 10^{-2}$ кг вылетают из ее сопла со скоростью 800 м/с?

127. От двухступенчатой ракеты массой 1 т при скорости 1710 м/с отделилась её вторая ступень массой 0,4 т. Скорость второй ступени при этом увеличилась до 1860 м/с. Определить, с какой скоростью стала двигаться первая ступени ракеты.

128. Вагон массой 3 т, движущийся по горизонтальному пути со скоростью 1,5 м/с, автоматически на ходу сцепляется с неподвижным вагоном массой 2 т. С какой скоростью движутся вагоны после сцепки?

129. При горизонтальном полете со скоростью 300 м/с снаряд массой 9 кг разорвался на две части. Большая часть массой 7 кг получила скорость 450 м/с в направлении полёта снаряда. Определить величину и направление скорости меньшей части снаряда.

130. Теннисный мяч, летящий со скоростью 10 м/с, отброшен ударом ракетки в противоположном направлении со скоростью 8 м/с. При этом его кинетическая энергия изменилась на 10 Дж.

тическая энергия изменилась на 5 Дж. Найти изменение количества движения мяча.

131. В деревянный шар массой 5 кг, подвешенный на нити, попадает горизонтально летящая пуля массой 5 г и застревает в нём. Найти скорость пули, если шар с застрявшей в нем пулей поднялся на высоту 10 см.

132. Два шара массами 2 и 3 кг, движущиеся по одной прямой навстречу друг другу со скоростями 8 и 4 м/с, соответственно, неупруго сталкиваются и двигаются после удара совместно. Определить работу деформации шаров после удара.

133. Молотком массой 1 кг забивают в стену гвоздь массой 75 г. Определить КПД удара.

134. Из орудия массой 5 т вылетает снаряд массой 100 кг. Кинетическая энергия снаряда при вылете $7,5 \cdot 10^6$ Дж. Какую кинетическую энергию получает орудие вследствие отдачи?

135. Тело массой 30 кг поднимают постоянной силой на высоту 10 м в течение 5 с. Определить работу этой силы.

136. На горизонтальном участке пути длиной 3 км скорость автомобиля увеличилась от 36 до 72 км/ч. Масса автомобиля 3 т, коэффициент трения 0,01. Чему равна работа, совершаемая двигателем автомобиля?

137. В пружинном ружье пружина сжата на 10 см. При взводе её сжали до 20 см. С какой скоростью вылетит из ружья стрела массой 30 г, если жесткость пружины 144 Н/м?

138. Две пружины жесткостью $3 \cdot 10^2$ и $5 \cdot 10^2$ Н/м соединены последовательно. Определить работу по растяжению обеих пружин, если вторая пружина растянута на 3 см.

139. Насколько растянулась пружина динамометра, если его указатель стоит на отметке 40 Н, а при растяжении была совершена работа 1,6 Дж?

140. Пружина жесткостью 10^4 Н/м сжата силой $2 \cdot 10^2$ Н. Определить работу внешней силы, дополнительно сжимающей эту пружину ещё на 1 см.

141. Диск массой 5 кг и радиусом 0,4 м вращается, делая 180 об/мин. Через 20 с после начала торможения диск останавливается. Найти момент сил торможения.

142. Якорь мотора вращается с частотой 1500 об/мин. Определить вращающий момент, если мотор развивает мощность 500 Вт.

143. Тонкий стержень длиной 50 см и массой 400 г вращается с угловым ускорением 3 рад/с^2 вокруг оси, проходящей через его середину, перпендикулярно длине стержня. Определить вращающий момент.

144. К ободу диска массой 5 кг приложена постоянная касательная сила 2 Н. Какую кинетическую энергию будет иметь диск через 5 секунд после начала действия силы?

145. Вал массой 100 кг и радиусом 5 см вращается с частотой 8 об/с. К поверхности вала прижали колодку, под действием которой вал остановился через 10 с. Определить коэффициент трения. Момент инерции вала рассматривать как для материальной точки.

146. Фигурист вращается, делая 6 об/с. Как изменится момент инерции фигуриста, если он прижмет руки к груди, и при этом частота вращения станет равной 18 об/с?

147. Какую работу нужно совершить, чтобы заставить маховик массой 0,5 т и диаметром 1,5 м остановиться? Частота вращения маховика 12 об/с. Считать массу маховика равномерно распределенной по ободу.

148. Сплошной цилиндр массой 4 кг катится без скольжения по горизонтальной поверхности. Линейная скорость оси цилиндра равна 1 м/с. Определить полную кинетическую энергию цилиндра.

149. С наклонной плоскости скатывается без скольжения диск. Высота наклонной плоскости 5 м. Найти скорость центра тяжести диска у основания наклонной плоскости, если его начальная скорость равна нулю.

150. Пуля массой 10 г летит со скоростью 800 м/с, вращаясь около продольной оси с частотой 3000 об/с. Считая пулю цилиндром диаметром 8 мм, определить полную кинетическую энергию.

151. За неделю из стакана испарилось 50 г воды. Сколько в среднем молекул вылетало с поверхности воды за 1 с?

152. Сколько молекул будет находиться в 1 см^3 сосуда при температуре 10°C , если сосуд откачан до разрежения, при котором давление в нем равно $1,33 \cdot 10^{-9} \text{ Па}$?

153. Определить число молей и число молекул газа, содержащегося в колбе емкостью 10 л, если температура газа равна 17°C , а давление 50 кПа.

154. До какой температуры нужно нагреть запаянный шар, содержащий 17,5 г воды, чтобы шар разорвался, если известно, что стенки шара выдерживают давление в 10 МПа, а объем шара равен 1 л?

155. Альпинист при каждом вдохе поглощает 5 г воздуха, находящегося при нормальных условиях. Найти объем воздуха, который должен вдыхать за то же время альпинист в горах, где давление равно 79,8 кПа, а температура -13°C . Молярная масса воздуха $29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

156. В дизеле в начале такта сжатия температура воздуха 40°C , а давление 78,4 кПа. Во время сжатия объем уменьшается в 15 раз, а давление возрастает до 3,5 МПа. Определить температуру воздуха в конце такта сжатия.

157. Из баллона со сжатым кислородом, находящимся при постоянной температуре, израсходовано столько кислорода, что его давление упало от 9,8 до 7,84 МПа. Какая часть первоначальной массы кислорода израсходована?

158. Плотность гелия при давлении 0,2 МПа равна $0,34 \text{ кг/м}^3$. Определить температуру газа.

159. В колбе емкостью 100 см^3 содержится некоторый газ при температуре 300 К. На сколько понизится давление газа в колбе, если вследствие утечки из колбы выйдет 10^{20} молекул?

160. Какова внутренняя энергия гелия, заполняющего аэростат объемом 60 м^3 при давлении 100 кПа?

161. При уменьшении объема одноатомного газа в 3,6 раза его давление увеличилось на 20 %. Во сколько раз изменилась внутренняя энергия газа?

162. Чему равна суммарная кинетическая энергия теплового движения молекул азота массой 20 г при температуре 10 °С? Какая часть этой энергии приходится на долю поступательного движения и какая часть на долю вращательного движения?

163. 1 кг двухатомного газа находится под давлением 80 кПа и имеет плотность 4 кг/м³. Найти полную энергию теплового движения молекул в этих условиях.

164. Найти среднюю кинетическую энергию молекул одноатомного газа при давлении 20 кПа. Концентрация молекул этого газа при данном давлении равна $3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

165. Определить количество теплоты, выделяющееся при изотермическом сжатии 7 г азота при изменении давления от 0,1 МПа до 0,5 МПа. Температура азота 25 °С.

166. Во сколько раз увеличится объем 0,4 моля водорода при изотермическом расширении, если при этом газ получает количество теплоты 800 Дж? Температура водорода 27 °С. Какую работу совершил газ при своем расширении?

167. Азот массой 12 г находится в закрытом сосуде объемом 2 л при температуре 10 °С. После нагревания давление в сосуде стало равным 1,33 МПа. Какое количество теплоты сообщено газу при нагревании?

168. В закрытом сосуде объемом 2 л находится азот, плотность которого 1,4 кг/м³. Какое количество теплоты надо сообщить азоту, чтобы нагреть его на 100 К? На сколько увеличится внутренняя энергия азота?

169. Водород массой 6,5 г, находящийся при температуре 27 °С, расширился вдвое при постоянном давлении за счет притока извне тепла. Найти работу расширения газа, изменение его внутренней энергии и количество теплоты, сообщенной газу.

170. Во сколько раз количество теплоты, которое идет на нагревание водорода при постоянном давлении, больше работы, совершаемой этим газом при

расширении? Удельная теплоемкость водорода при постоянном давлении равна $14,6 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

171. При адиабатическом расширении азота массой 50 г совершена работа 3 кДж . Насколько уменьшилась внутренняя энергия и понизилась температура азота?

172. Вычислить теплоемкость при постоянном объеме газа, заключенного в сосуд емкостью 20 л при нормальных условиях. Газ одноатомный.

173. Вычислить удельные теплоемкости газа при постоянном давлении и при постоянном объеме, зная, что его молярная масса равна $44 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, а показатель адиабаты равен $1,33$.

174. В ходе цикла Карно рабочее вещество получает от теплоотдатчика количество теплоты, равное 300 кДж . Температуры теплоотдатчика и теплоприемника равны соответственно 480 и 280 К . Определить термический КПД цикла и работу, совершаемую рабочим веществом за цикл.

175. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно, термический КПД которого 40% . Температура теплоприемника равна 0°С . Найти температуру теплоотдатчика и работу изотермического сжатия, если в процессе изотермического расширения совершается работа 8 Дж .

176. Идеальная тепловая машина за счет каждого килоджоуля теплоты, полученной от теплоотдатчика в течение каждого цикла, совершает работу, равную 300 Дж . Определить термический КПД машины и температуру теплоотдатчика, если температура теплоприемника равна 280 К .

177. Тепловая машина работает по циклу Карно, термический КПД которого равен 25% . Каков будет холодильный коэффициент машины, если она будет совершать цикл в обратном направлении?

178. Холодильная машина работает по обратному циклу Карно, холодильный коэффициент которого равен 300% . Каков термический КПД тепловой машины, работающей по прямому циклу Карно?

179. Тепловую машину, работающую по циклу Карно, термический коэффициент которого равен 40% , используют как холодильную машину с теми

же тепловыми резервуарами. Найти ее холодильный коэффициент. Какое количество теплоты отводится из камеры холодильной машины, если над рабочим веществом за цикл совершается работа 10 кДж?

180. Двухатомный газ совершает цикл Карно. Определить термический КПД цикла, если известно, что при адиабатическом сжатии каждого моля газа совершается работа 2 кДж. Температура теплоотдатчика равна 400 К.

4.1.5. Методические указания к выполнению контрольной работы № 2

В контрольную работу № 2 включены задачи по темам: “Электростатика”, “Постоянный электрический ток”, “Магнитостатика”, “Электромагнитная индукция”.

Задачи 201...230 относятся к теме “Электростатика. Задачи 231...241 относятся к теме “Постоянный электрический ток”. Задачи 242...269 относятся к теме “Магнитостатика”. Задачи 270...280 относятся к теме “Электромагнитная индукция”.

Таблица 4.1.2

Вариант	Номера задач							
0	201	211	221	231	241	251	261	271
1	202	212	222	232	242	252	262	272
2	203	213	223	233	243	253	263	273
3	204	214	224	234	244	254	264	274
4	205	215	225	235	245	255	265	275
5	206	216	226	236	246	256	266	276
6	207	217	227	237	247	257	267	277
7	208	218	228	238	248	258	268	278
8	209	219	229	239	249	259	269	279
9	210	220	230	240	250	260	270	280

Перед выполнением контрольной работы необходимо проработать материал соответствующих разделов, внимательно ознакомиться с основными законами и формулами. После этого надо разобрать примеры решения типовых задач.

4.1.6. Примеры решения задач

Задача 3.1

В вершинах квадрата находятся одинаковые точечные заряды 30 нКл. Какой отрицательный заряд надо поместить в центре квадрата, чтобы указанная система зарядов находилась в равновесии?

Дано:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 30 \text{ нКл} = 30 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q = ?$$

Решение. Все заряды, расположенные в вершинах квадрата, находятся в одинаковых условиях. Поэтому достаточно выяснить, какой заряд следует поместить в центр квадрата, чтобы какой-нибудь из четырех зарядов, например q_1 , находился в равновесии. Заряд q_1 будет находиться в равновесии, если векторная сумма действующих на него сил равна 0.

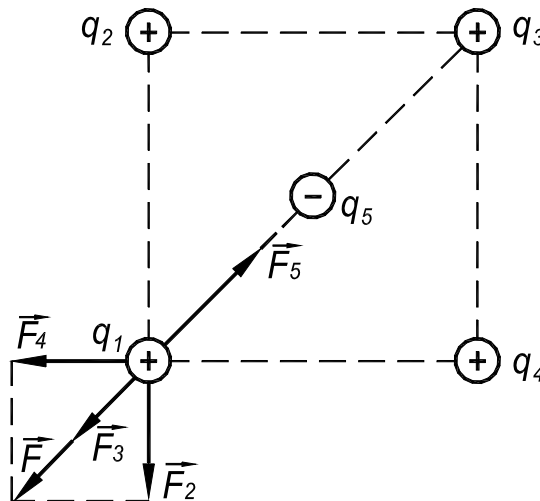


Рис. 1

$$\vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + \vec{F}_5 = \vec{F} + \vec{F}_3 + \vec{F}_5 = 0, \quad (1)$$

где \vec{F}_2 , \vec{F}_3 , \vec{F}_4 , \vec{F}_5 – силы, с которыми соответственно действуют на заряд q_1 заряды q_2 , q_3 , q_4 , q_5 ; $\vec{F} = \vec{F}_2 + \vec{F}_4$ – равнодействующая сил \vec{F}_2 и \vec{F}_4 .

По закону Кулона, имея в виду, что $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q$, получим:

$$F_2 = F_4 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{\epsilon a^2}, \quad (2)$$

$$F_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{\epsilon r^2}, \quad (3)$$

$$F_5 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q|q_5|}{\epsilon (r/2)^2}, \quad (4)$$

где a – сторона квадрата; $r = a\sqrt{2}$ – диагональ квадрата.

Равнодействующая сил \vec{F}_2 и \vec{F}_4 , как следует из рис. 1, по направлению совпадает с силой F_3 и по модулю равна $F = \sqrt{F_2^2 + F_4^2} = F_2\sqrt{2}$. С учетом этого векторное равенство (1) можно заменить скалярным

$$F + F_3 - F_5 = F_2\sqrt{2} + F_3 - F_5. \quad (5)$$

Равенство (5) с учетом (2) – (4) примет вид

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2\sqrt{2}}{\epsilon a^2} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{\epsilon 2a^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q|q_5|}{\epsilon a^2/2} = 0.$$

Откуда $|q_5| = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{4} \right).$

Произведя вычисления, получим:

$$|q_5| = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{4} \right) 3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} = 2,87 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}.$$

Следует отметить, что равновесие системы зарядов будет неустойчивым.

Задача 3.2

Два точечных заряда 2 и –1 нКл находятся в воздухе на расстоянии 5 см друг от друга. Определить напряженность и потенциал электростатического поля в точке, удаленной от первого заряда на расстояние 6 см и от второго заряда на 4 см.

Дано:

$$q_1 = 2 \text{ нКл} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -1 \text{ нКл} = -10^{-9} \text{ Кл}$$

$$\varepsilon = 1; 1/4\pi\varepsilon_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ М/Ф}$$

$$d = 5 \text{ см}$$

$$r_1 = 6 \text{ см} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_2 = 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

E - ? φ - ?

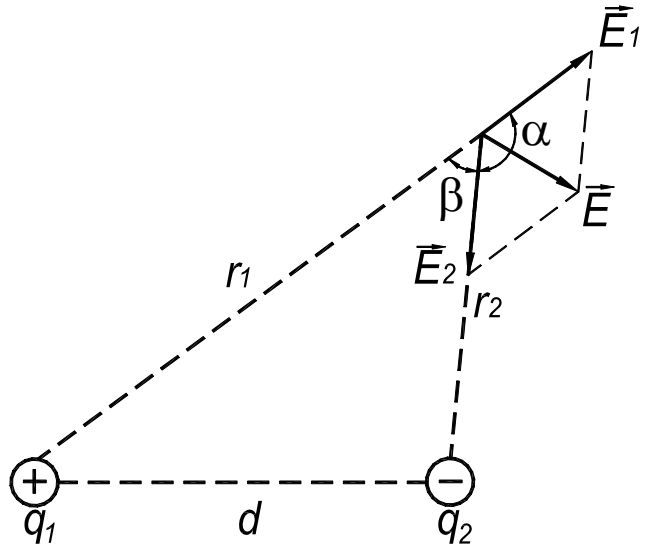


Рис. 2

Решение. Согласно принципу суперпозиции электрических полей каждый заряд создает поле независимо от присутствия в пространстве других зарядов. Напряженность результирующего поля $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Напряженности полей, создаваемых в воздухе ($\varepsilon = 1$) зарядами q_1 и q_2 :

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1}{r_1^2}, \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{|q_2|}{r_2^2}. \quad (2)$$

Направления векторов \vec{E}_1 и \vec{E}_2 указаны на рис. 2. Модуль вектора \vec{E} найдем по теореме косинусов

$$E = (E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha)^{1/2},$$

где α – угол между векторами \vec{E}_1 и \vec{E}_2 . Из рис. 2 видно, что $\beta = \pi - \alpha$. Тогда $\cos \beta = -\cos \alpha$.

Следовательно,

$$E = (E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cos \beta)^{1/2}. \quad (3)$$

Из треугольника со сторонами r_1 , r_2 и d по теореме косинусов находим

$$\cos \beta = (r_1^2 + r_2^2 - d^2)/(2r_1r_2). \quad (4)$$

Произведя вычисления по формулам (1), (2), (4), получим:

$$E_1 = 9 \cdot 10^{-9} \frac{2 \cdot 10^{-9}}{(6 \cdot 10^{-2})^2} = 5 \cdot 10^3 \text{ В/м},$$

$$E_2 = 9 \cdot 10^{-9} \frac{10^{-9}}{(4 \cdot 10^{-2})^2} = 5,62 \cdot 10^3 \text{ В/м}.$$

$$\cos \beta = \frac{6^2 + 4^2 - 5^2}{2 \cdot 6 \cdot 4} = 0,565.$$

При вычислении E_2 знак заряда q_2 опущен, так как знак минус определяет направление вектора \vec{E}_2 , а направление \vec{E}_2 было учтено при его графическом изображении (см. рис. 2).

Напряженность результирующего поля будет равна

$$E = \sqrt{(5 \cdot 10^3)^2 + (5,62 \cdot 10^3)^2 - 2 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 5,62 \cdot 10^3 \cdot 0,565} = 4,97 \cdot 10^3 \text{ В/м}.$$

По принципу суперпозиции потенциал результирующего поля, создаваемого зарядами q_1 и q_2 , равен алгебраической сумме потенциалов φ_1 и φ_2 , т.е. $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, или

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{\epsilon r_1} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{\epsilon r_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} \right). \quad (5)$$

Произведя вычисления, получим:

$$\varphi = 9 \cdot 10^9 \left(\frac{2 \cdot 10^{-9}}{6 \cdot 10^{-2}} + \frac{-10^{-9}}{4 \cdot 10^{-2}} \right) = 75 \text{ В}.$$

Задача 3.3

Электрон движется вдоль силовой линии однородного электрического поля. В точке поля с потенциалом 100 В электрон имел скорость 4 Мм/с. Определить потенциал точки поля, дойдя до которой электрон потеряет половину своей скорости.

Дано:

$$\varphi_1 = 100 \text{ В}$$

$$v_1 = 4 \text{ Мм/с} = 4 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 2 \text{ Мм/с} = 2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг};$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

$$\varphi_2 = ?$$

Решение. Из-за отсутствия сил трения полная механическая энергия электрона не изменяется, т. е. $W = mv^2/2 + (-e\varphi) = \text{const}$, где $mv^2/2$ – кинетическая и $(-e\varphi)$ – потенциальная энергия электрона. Полная энергия в начале движения

$$W_1 = \frac{mv_1^2}{2} + (-e\varphi_1), \quad (1)$$

в конце движения с учетом того, что $v_2 = v_1/2$,

$$W_2 = \frac{mv_2^2}{2} + (-e\varphi_2) = \frac{mv_1^2}{8} + (-e\varphi_2). \quad (2)$$

Приравнявая выражения (1) и (2), получим для потенциала

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \frac{3mv_1^2}{8e}.$$

Произведя вычисления, получим:

$$\varphi_2 = 100 - \frac{3 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (4 \cdot 10^6)^2}{8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 66 \text{ В.}$$

Возможен и другой подход к решению. Изменение кинетической энергии частицы равно работе результирующей силы, то есть

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = A.$$

С другой стороны, работа сил электростатического поля равна

$$A = -e(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Задача 3.4

Сила взаимного притяжения пластин плоского воздушного конденсатора 50 мН. Площадь каждой пластины 200 см². Определить объемную плотность энергии поля конденсатора.

Дано:

$$F = 50 \text{ мН} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$$

$$S = 200 \text{ см}^2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$\varepsilon = 1$$

W - ?

Решение. Объемная плотность энергии поля конденсатора

$$w = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2}, \quad (1)$$

где $E = \sigma / \varepsilon \varepsilon_0$ – напряженность электрического поля между пластинами конденсатора; σ – поверхностная плотность заряда на пластинах.

Подставив выражение для E в (1), получим:

$$w = \frac{\sigma^2}{2 \varepsilon \varepsilon_0}. \quad (2)$$

Найдем силу взаимного притяжения пластин. Заряд $q = \sigma S$ одной пластины находится в поле напряженностью $E_1 = |\sigma| / 2 \varepsilon \varepsilon_0$, созданном зарядом другой пластины конденсатора. Следовательно, на заряд первой пластины действует сила

$$F = q E_1 = \frac{\sigma^2 S}{2 \varepsilon \varepsilon_0}. \quad (3)$$

Выразив σ^2 из выражения (3) и подставив в (2), получим:

$$w = F / S.$$

Проверим, дает ли расчетная формула единицу объемной плотности энергии. Для этого в правую часть формулы вместо величин подставим их единицы измерений:

$$\frac{[F]}{S} = \frac{1\text{Н}}{1\text{м}^2} = \frac{1\text{Н} \cdot 1\text{м}}{1\text{м}^2 \cdot 1\text{м}} = 1 \text{ Дж/м}^3.$$

Произведя вычисления, получим:

$$w = \frac{5 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-2}} = 2,5 \text{ Дж/м}^3.$$

Задача 3.5

ЭДС батареи аккумуляторов 12 В. Наибольшая сила тока, которую может дать батарея, 5 А. Определить максимальную мощность, которая может выделяться во внешней цепи.

Дано:

$$\varepsilon = 12 \text{ В}$$

$$I_{\max} = 5 \text{ А}$$

$$P_{\max} = ?$$

Решение. По закону Ома для полной цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R_0 + R}, \quad (1)$$

где R_0 – внутреннее сопротивление аккумулятора; R – сопротивление внешней цепи (сопротивление нагрузки).

Максимальная сила тока будет при коротком замыкании ($R = 0$).

$$I_{\max} = \frac{\varepsilon}{R_0}. \quad (2)$$

Из формулы (2) находим внутренне сопротивление

$$R_0 = \frac{\varepsilon}{I_{\max}}. \quad (3)$$

Мощность, которая выделяется во внешней цепи (полезная мощность),

$$P = I^2 R. \quad (4)$$

С учетом закона Ома (1) получим:

$$P = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + R_0)^2}. \quad (5)$$

Исследуя функцию (5) на максимум, найдем сопротивление нагрузки, при котором мощность максимальна:

$$\frac{dP}{dR} = \frac{\varepsilon^2 (R - R_0)}{(R + R_0)^3} = 0. \quad (6)$$

Из равенства (6) следует, что

$$R = R_0 \quad (7)$$

Подставив (7) в формулу (5), найдем выражение для максимальной мощности

$$P_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4R_0}. \quad (8)$$

С учетом формулы (3) получим:

$$P_{\max} = \frac{\varepsilon I_{\max}}{4}.$$

Произведя вычисления, получим

$$P_{\max} = \frac{12 \cdot 5}{4} = 15.$$

Задача 3.6

При включении электродвигателя в сеть постоянного тока с напряжением 220 В, он развивает мощность 6,6 кВт. Определить силу тока, потребляемую двигателем и его КПД, если сопротивление обмотки двигателя 2 Ом.

Дано:

$$U = 220 \text{ В}$$

$$P = 6,6 \text{ кВт} = 6,6 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

$$R = 2 \text{ Ом}$$

$$I = ? \quad \eta = ?$$

Решение. Полная мощность, развиваемая электродвигателем,

$$P = IU.$$

Ток, потребляемый двигателем,

$$I = \frac{P}{U}. \quad (1)$$

Мощность, идущая на нагрев обмоток,

$$P_{\text{н}} = I^2 R.$$

КПД двигателя

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{н}}}{P} = 1 - \frac{I^2 R}{P} = 1 - \frac{PR}{U^2}.$$

Подставляя заданные значения, получим:

$$I = \frac{6,6 \cdot 10^3}{220} = 30 \text{ A},$$

$$\eta = 1 - \frac{6,6 \cdot 10^3 \cdot 2}{220^2} \approx 0,73.$$

Задача 3.7

По двум бесконечно длинным параллельным проводам текут в одинаковом направлении токи силой $I_1 = 15 \text{ A}$ и $I_2 = 10 \text{ A}$. Расстояние между проводами $d = 10 \text{ см}$. Определить магнитную индукцию в точке A (рис. 3), удаленной от первого провода на расстояние $r_1 = 10 \text{ см}$ и от второго провода на расстояние $r_2 = 15 \text{ см}$.

Дано:

$$I_1 = 15 \text{ A}$$

$$I_2 = 10 \text{ A}$$

$$\mu = 1$$

$$d = 10 \text{ см}$$

$$r_1 = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$r_2 = 15 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$B = ?$

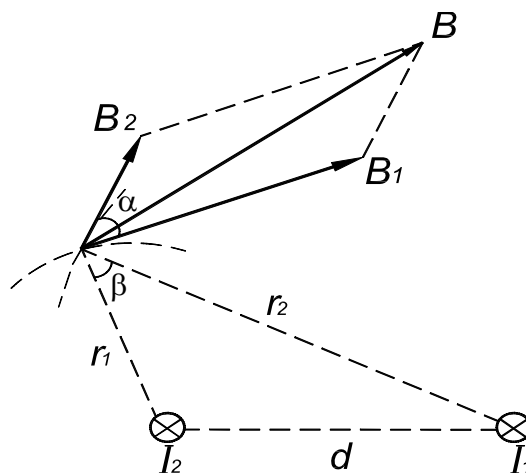


Рис. 3

Решение. Согласно принципу суперпозиции магнитных полей магнитная индукция \vec{B} в точке A равна сумме векторов магнитных индукций полей \vec{B}_1 и \vec{B}_2 , созданных каждым током в отдельности:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2, \quad (1)$$

где $B_1 = \mu\mu_0 I_1 / (2\pi r_1)$ и $B_2 = \mu\mu_0 I_2 / (2\pi r_2)$. На рис. 3 проводники с токами I_1 и I_2 перпендикулярны плоскости чертежа (токи направлены от наблюдателя). Векторы \vec{B}_1 и \vec{B}_2 изображены на рис. 3 так, что их направление связано с направлением соответствующих токов правилом правого винта. Векторы \vec{B}_1 и \vec{B}_2 в точке A направлены по касательной к силовым линиям.

Модуль вектора \vec{B} на основании теоремы косинусов равен

$$B = (B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2 \cos \alpha)^{1/2}, \quad (2)$$

где α – угол между векторами \vec{B}_1 и \vec{B}_2 . Из рис. 3 видно, что углы α и β равны как углы с соответственно перпендикулярными сторонами. Из треугольника со сторонами r_1 , r_2 и d по теореме косинусов находим $\cos \alpha$:

$$\cos \alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1r_2}.$$

Вычислим отдельно

$$\cos \alpha = \cos \beta = \frac{10^2 + 15^2 - 10^2}{2 \cdot 10 \cdot 15} \approx 0,75.$$

Подставляя выражения для B_1 и B_2 в формулу (2) и вынося $\mu\mu_0/(2\pi)$ за знак корня, получаем

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{I_1^2}{r_1^2} + \frac{I_2^2}{r_2^2} + \frac{2I_1I_2}{r_1r_2} \cos \alpha}.$$

Произведем вычисления:

$$B = \frac{1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{15^2}{(10^{-1})^2} + \frac{10^2}{(1,5 \cdot 10^{-1})^2} + \frac{2 \cdot 10 \cdot 15 \cdot 0,75}{10^{-1} \cdot 1,5 \cdot 10^{-1}}} = 4,1 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.}$$

Задача 3.8

Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов 50 В, влетает в однородное магнитное поле под прямым углом к линиям индукции. Определить величину вектора магнитной индукции, если радиус окружности, по которой движется электрон, равен 10 см.

Дано:

$$U = 50 \text{ В}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$R = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$B - ?$

Решение. В магнитном поле электрон под действием силы Лоренца движется по окружности радиуса R в плоскости, перпендикулярной силовым линиям индукции магнитного поля,

$$F_{\text{л}} = evB.$$

Сила Лоренца сообщает электрону нормальное ускорение. По второму закону Ньютона

$$F_{\text{л}} = ma_n \text{ или } evB = \frac{mv^2}{R},$$

где R – радиус окружности, получаем соотношение

$$B = \frac{mv}{eR}. \quad (1)$$

Кинетическую энергию $W = mv^2/2$ электрон приобретает за счет работы сил электростатического поля ($A = eU$, где U – разность потенциалов).

Поэтому

$$eU = \frac{mv^2}{2}.$$

Отсюда скорость электрона

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (2)$$

Формула (1) с учетом (2) примет вид

$$B = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{2mU}{e}}.$$

Подставим числовые данные, получим:

$$B = \frac{1}{0,1} \sqrt{\frac{2 \cdot 50 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{1,6 \cdot 10^{-19}}} = 2,38 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}.$$

Проверим размерность

$$[B] = \frac{1}{[R]} \sqrt{\frac{[m][U]}{[e]}} = \frac{1}{\text{м}} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{В}}{\text{Кл}}}.$$

По определению потенциала $B = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$, а $\text{Дж} = \text{Н} \cdot \text{м} = \frac{\text{кг}^2 \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$.

$$\text{Таким образом, } \frac{1}{\text{м}} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{В}}{\text{Кл}}} = \frac{1}{\text{м}} \sqrt{\frac{\text{кг}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2 \cdot \text{с}^2}} = \frac{1}{\text{м}} \cdot \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{Кл} \cdot \text{с}}.$$

Из определения силы тока $I = \frac{dq}{dt}$ следует, что $\text{Кл} = \text{А} \cdot \text{с}$.

$$\text{Таким образом, } \frac{1}{\text{м}} \cdot \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{Кл} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{1}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

В соответствии с выражением для силы Ампера $F = IBl \sin \alpha$,

где $\text{Н} = \text{А} \cdot \text{Тл} \cdot \text{м}$, найдем, что $\frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл}$.

Задача 3.9

Плоский круговой виток радиусом 20 см вращается с постоянной угловой скоростью 300 рад/с в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл, причем ось вращения лежит в плоскости витка и перпендикулярна вектору индукции. Найти максимальное значение ЭДС индукции.

Дано:

$$R = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$$

$$B = 0,1 \text{ Тл}$$

$$\omega = 300 \text{ рад/с}$$

$$\mathcal{E}_{\text{imax}} = ?$$

Решение. При вращении витка непрерывно изменяется угол α между вектором \vec{B} и нормалью к плоскости витка, следовательно, изменяется магнитный поток Φ , пронизывающий виток. В витке возникает ЭДС индукции, мгновенное значение которой по закону Фарадея равно

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Для однородного поля магнитный поток, пронизывающий виток, равен $\Phi = BS \cos \alpha$. С учетом того, что при вращении витка с постоянной угловой скоростью мгновенное значение угла $\alpha = \omega t$, получим:

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t.$$

Подставив в формулу (1) выражение для Φ и продифференцировав по времени, найдем мгновенное значение ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = BS \omega \sin \omega t.$$

Максимальное значение ЭДС индукции равно

$$\mathcal{E}_{\text{imax}} = BS \omega.$$

Произведя вычисления, получим:

$$\mathcal{E}_{\text{imax}} = 0,1 \cdot \pi \cdot 0,2^2 \cdot 300 \approx 3,8B.$$

Проверим размерность:

$$[\mathcal{E}] = [B] \cdot [S] \cdot [\omega] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 \cdot \frac{1}{\text{с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} \cdot \text{м}^2 \cdot \frac{1}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}.$$

4.1.7. Задание на контрольную работу № 2

201. Когда два одинаковых шарика, массы которых равны 400 мг, подвешенные на закрепленных в одной точке нитях равной длины, зарядили одноименными зарядами, эти шарики разошлись на расстояние 15 см друг от друга, причем нити образовали прямой угол. Найти заряд каждого шарика.

202. Две длинные прямые параллельные нити находятся на расстоянии 10 см друг от друга. На нитях равномерно распределены заряды с линейными плотностями 3 и -4 нКл/см. Определить напряженность электрического поля в точке, удаленной от первой нити на расстояние 6 см и от второй – на расстояние 8 см.

203. В вершинах квадрата со стороной 20 см расположены три положительных и один отрицательный заряд. Определить напряженность и потенциал электрического поля в центре квадрата, если величина каждого заряда 3 нКл.

204. Четыре одинаковых точечных заряда 40 нКл закреплены в вершинах квадрата со стороной 10 см. Найти силу, действующую на один из этих зарядов со стороны трех остальных.

205. Три одинаковых точечных заряда 4 нКл находятся в вершинах равностороннего треугольника со стороной 8 см. Найти силу, действующую на один из зарядов со стороны двух остальных.

206. Два одинаковых точечных заряда по 1 нКл находятся в воздухе на расстоянии 2 см друг от друга. Определить напряженность и потенциал электростатического поля в точке, удаленной на расстояние 3 см как от первого, так и от второго заряда.

207. Две бесконечные параллельные пластины равномерно заряжены с поверхностной плотностью заряда 0,3 и 0,7 мкКл/м². Определить напряженность поля между пластинами и вне пластин. Найти разность потенциалов между пластинами, если расстояние между ними 4 см.

208. Решить предыдущую задачу при условии, что заряд второй пластины отрицательный.

209. Два точечных разноименных заряда величиной 4 и -4 нКл находятся на расстоянии 6 см друг от друга в воздухе. Найти напряженность и потенциал электростатического поля в точке, находящейся на расстоянии 6 см от каждого заряда.

210. В центре металлической полый сферы, радиус которой 4 см, расположен точечный заряд 1 нКл. Отрицательный заряд величиной -4 нКл равномерно распределен по поверхности сферы. Определить напряженность электрического поля в точках, удаленных от центра сферы на расстояниях 2 и 6 см.

211. Два положительных точечных заряда q и $4q$ закреплены на расстоянии 60 см друг от друга. Определить, в какой точке на прямой, проходящей через заряды, следует поместить третий заряд так, чтобы действующая на него сила равнялась нулю.

212. Электростатическое поле создано бесконечной равномерно заряженной плоскостью с поверхностной плотностью заряда 2 мкКл/м². Определить работу сил поля по перемещению точечного заряда 3 нКл вдоль силовой линии на расстояние 5 см.

213. Какая работа совершается при перемещении точечного заряда 30 нКл из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии 2 см от поверхности сферы радиусом 1 см, равномерно заряженной с поверхностной плотностью заряда 2 нКл/см² ?

214. Протон влетел в однородное электрическое поле с напряженностью 300 В/см в направлении силовых линий со скоростью 100 км/с. Какой путь должен пройти протон, чтобы его скорость удвоилась?

215. Полый шар несет на себе равномерно распределенный заряд. Определить радиус шара, если потенциал в центре шара 200 В, а в точке, лежащей от его центра на расстоянии 50 см, потенциал 40 В.

216. Электрон вылетает из точки с потенциалом 600 В, имея скорость 3 Мм/с, направленную вдоль силовой линии электростатического поля. Определить потенциал той точки поля, в которой электрон остановится.

217. Электрон, обладающий кинетической энергией 5 эВ, влетел в однородное электрическое поле в направлении силовых линий поля. Какой скоростью будет обладать электрон, пройдя в этом поле разность потенциалов 2 В?

218. Под действием сил электростатического поля равномерно заряженной бесконечной плоскости точечный заряд 1 нКл переместился вдоль силовой линии на расстояние 1 см. При этом совершена работа 5 мкДж. Определить поверхностную плотность заряда на плоскости.

219. В однородном электрическом поле с напряженностью 1 кВ/м переместили заряд – 25 нКл в направлении силовой линии на расстояние 2 см. Найти работу сил поля, изменение потенциальной энергии заряда и разность потенциалов между начальной и конечной точками.

220. Пылинка массой 0,01 мг, несущая на себе заряд 10 нКл, влетела в однородное электрическое поле в направлении силовых линий. После прохождения разности потенциалов 150 В пылинка имела скорость 20 м/с. Какова была скорость пылинки до того, как она влетела в электрическое поле?

221. На два последовательно соединенных конденсатора электроемкостью 1 и 2 мкФ подано постоянное напряжение 30 В. Определить заряд на пластинах каждого конденсатора и разность потенциалов между их обкладками.

222. Какой максимальный заряд может накопить плоский воздушный конденсатор с площадью пластин $8,5 \text{ см}^2$, если электрический пробой сухого воздуха наступает при напряженности электрического поля 3 МВ/м?

223. Плоский слюдяной конденсатор, заряженный до разности потенциалов 400 В, обладает энергией 5 мкДж. Площадь пластин составляет 100 см^2 . Определить расстояние между пластинами, напряженность и объемную плотность энергии электрического поля конденсатора. Диэлектрическая проницаемость слюды 7.

224. Во время езды по шоссе с бетонным покрытием трение колес о шоссе вызвало появление на корпусе автомобиля электрического потенциала в 3 кВ. Чему равна средняя сила кратковременного разрядного тока, стекающего

с корпуса при его заземлении, если время разряда $0,2 \text{ мкс}$, а емкость корпуса относительно земли 200 пФ ?

225. В импульсной фотовспышке лампа питается от конденсатора емкостью 800 мкФ , заряженного до напряжения 300 В . Найти энергию вспышки и среднюю мощность, если продолжительность разряда $2,4 \text{ мс}$.

226. Два одинаковых плоских воздушных конденсатора, емкостью 100 пФ каждый, соединены в батарею последовательно. Определить, насколько изменится емкость батареи, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнить парафином. Диэлектрическая проницаемость парафина 2 .

227. Какое количество теплоты выделится при разряде плоского конденсатора, если разность потенциалов между пластинами равна 15 кВ , расстояние 1 мм , диэлектрик – слюда (диэлектрическая проницаемость слюды 7) и площадь каждой пластины 300 см^2 ?

228. Плоский воздушный конденсатор заряжен до разности потенциалов 300 В . Площадь пластин 100 см^2 , напряженность поля между пластинами 60 кВ/м . Определить поверхностную плотность заряда на пластинах, емкость и энергию конденсатора.

229. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора 2 кВ , а расстояние между ними 2 мм , заряд каждой пластины 1 нКл . Определить силу взаимного притяжения пластин и энергию конденсатора.

230. Определить силу взаимного притяжения пластин плоского конденсатора, если площадь каждой пластины 100 см^2 , а объемная плотность энергии электрического поля конденсатора $0,3 \text{ Дж/м}^3$.

231. ЭДС аккумулятора 12 В . Определить максимальную мощность, которая может выделиться во внешней цепи. Наибольшая сила тока, которую может дать этот источник, 12 А .

232. ЭДС аккумулятора 12 В . Определить максимальную мощность, которая может выделиться во внешней цепи, если при подключении реостата сопротивлением $1,8 \text{ Ом}$ выделяется мощность 72 Вт .

233. При включении электромотора в сеть с напряжением 220 В он потребляет ток 5 А. Определить мощность, потребляемую мотором и его КПД, если сопротивление обмотки мотора равно 6 Ом.

234. ЭДС аккумулятора автомобиля 12 В. При силе тока 3 А его КПД 80 %. Определить внутреннее сопротивление аккумулятора.

235. Дуговая лампа мощностью 175 Вт рассчитана на напряжение 50 В. Ее надо включить в сеть с напряжением 120 В с помощью дополнительного сопротивления из никелиновой проволоки диаметром 0,4 мм. Найти длину проволоки.

236. К автомобильному аккумулятору подключены параллельно 2 фары мощностью по 60 Вт. Найти ток разряда аккумулятора, если напряжение на его клеммах 12 В.

237. Чему равно внутреннее сопротивление 12-вольтового автомобильного аккумулятора, если напряжение на его клеммах падает до 7,8 В при включении стартера, потребляющего ток силой 70 А?

238. В алюминиевом проводнике объемом 6 см^3 при прохождении по нему постоянного тока за 5 мин выделилось количество теплоты, равное 130 Дж. Вычислить напряженность электрического поля в проводнике.

239. В медном проводнике длиной 2 м и площадью поперечного сечения $9,4 \text{ мм}^2$ течет ток. При этом ежеминутно выделяется количество теплоты 20,4 Дж. Какова плотность тока в проводнике?

240. Электродвигатель трамвая работает при силе тока 108 А и напряжении 500 В. Какова скорость трамвая, если двигатель создает силу тяги 3,6 кН, а его КПД равен 70 %?

241. Плотность тока в никелиновом проводнике длиной 4 м равна 1 А/мм^2 . Определить разность потенциалов на концах проводника.

242. При каком внешнем сопротивлении потребляемая мощность будет максимальной, если два одинаковых источника с ЭДС 6 В и внутренним сопротивлением 1 Ом каждый, соединены последовательно? Чему равна эта мощность?

243. Определить плотность тока, если за две секунды через проводник с площадью поперечного сечения $1,6 \text{ мм}^2$ прошло $2 \cdot 10^{19}$ электронов.

244. К батарее аккумуляторов с ЭДС 2 В и внутренним сопротивлением 0,5 Ом присоединен проводник. При каком сопротивлении проводника мощность, выделяемая в нем, максимальна?

245. Электродвигатель работает 0,5 часа от сети с напряжением 200 В при силе тока 20 А. Сопротивление обмотки двигателя 0,5 Ом. Определить совершенную двигателем механическую работу и КПД электродвигателя.

246. По двум бесконечно длинным параллельным проводам, находящимся на расстоянии 10 см друг от друга в воздухе текут в одном направлении токи силой 20 и 30 А. Определить индукцию магнитного поля в точке, лежащей на прямой, соединяющей оба провода, и находящейся на расстоянии 2 см от первого провода.

247. Решить предыдущую задачу при условии, что токи в проводниках текут в противоположных направлениях.

248. Два бесконечно длинных провода скрещены под прямым углом. Расстояние между проводами равно 10 см. По проводам текут одинаковые токи силой 10 А. Найти индукцию и напряженность магнитного поля в точке, находящейся на середине расстояния между проводами.

249. По двум тонким длинным параллельным проводам, расстояние между которыми 5 см, текут токи силой 6 и 4 А. Определить индукцию и напряженность магнитного поля в точке, удаленной на расстояние 3 см от первого провода и на расстояние 4 см от второго провода, если провода находятся в воздухе.

250. По двум одинаковым круговым виткам радиусом 7 см, плоскости которых взаимно перпендикулярны, а центры совпадают, текут одинаковые токи силой 3 А. Найти напряженность и индукцию магнитного поля в центре витков.

251. Два тонких длинных прямолинейных параллельных провода находятся в воздухе на расстоянии 10 см друг от друга. По проводам текут токи силой 5 и 10 А. Найти индукцию и напряженность магнитного поля в точке, нахо-

дящейся на середине расстояния между проводами, если токи текут: а) в одинаковом; б) противоположном направлении.

252. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводам, расстояние между которыми 20 см, текут в одном направлении токи силой 4 и 8 А. Определить индукцию и напряженность магнитного поля в точке, удаленной от первого провода на расстояние 12 см и от второго – 16 см.

253. Определить индукцию и напряженность магнитного поля в центре длинного соленоида, если сопротивление его обмотки 120 Ом, а напряжение на ее концах 60 В. Соленоид содержит 1000 витков, а его длина 0,5 м.

254. По двум длинным параллельным проводам, находящимся на расстоянии 8 см в воздухе, текут в одном направлении одинаковые токи силой 6 А. Определить индукцию и напряженность магнитного поля в точке, удаленной от каждого провода на расстояние 8 см.

255. Бесконечно длинный провод образует круговой виток, касательный к проводу. По проводу идет ток силой 5 А. Найти радиус витка, если напряженность магнитного поля в центре витка 41 А/м.

256. Рамка гальванометра длиной 4 см и шириной 1,5 см, содержащая 200 витков тонкой проволоки, находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл. Плоскость рамки параллельна линиям индукции. Найти магнитный момент рамки и механический момент, действующий на рамку, если по витку течет ток силой 1 мА.

257. Определить напряженность однородного горизонтального магнитного поля, в котором в равновесии находится незакрепленный прямолинейный медный проводник с током силой 10 А. Диаметр проводника 4 мм. Плотность меди $8,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

258. Проводник, согнутый в виде квадрата со стороной 8 см, лежит на столе. По проводнику течет ток силой 0,5 А, величина которого поддерживается неизменной. Квадрат, потянув за противоположные вершины, вытянули в линию. Определить совершенную при этом работу. Вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли 40 А/м.

259. По проводнику, согнутому в виде квадрата со стороной 10 см, течет ток силой 2 А, величина которого поддерживается неизменной. Плоскость квадрата составляет угол 30° с линиями однородного магнитного поля с индукцией 0,2 Тл. Вычислить работу, которую надо совершить, чтобы удалить проводник за пределы поля.

260. Какой вращающий момент действует на рамку с током силой 2 А, при помещении её в однородное магнитное поле с индукцией 0,2 Тл, если рамка содержит 30 витков площадью 10 см^2 , а плоскость рамки образует угол 60° с силовыми линиями поля?

261. В однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл равномерно движется прямой проводник длиной 1 м, по которому течет ток силой 2 А. Скорость проводника 15 см/с и направлена перпендикулярно силовым линиям поля. Найти работу перемещения проводника за время 5 с и мощность, затраченную на это перемещение.

262. Между полюсами электромагнита создается однородное магнитное поле с индукцией 20 мТл. Проводник, масса единицы длины которого 0,01 кг/м, расположен горизонтально, причем его направление перпендикулярно силовым линиям поля. Какой силы ток должен идти через проводник, чтобы он висел, не падая?

263. Электрон с кинетической энергией 50 эВ движется параллельно прямолинейному длинному проводу на расстоянии 3 мм от него. Какая сила будет действовать на электрон, если по нему пропустить ток силой 5 А?

264. Заряженная частица, обладающая скоростью 2 Мм/с, влетела в однородное магнитное поле с индукцией 0,52 Тл. Найти отношение заряда частицы к ее массе, если частица описала в поле дугу окружности радиусом 4 см.

265. Протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов 600 В, влетел в однородное магнитное поле с индукцией 0,3 Тл перпендикулярно линиям индукции. Вычислить радиус окружности, по которой начал двигаться протон.

266. Заряженная частица движется в магнитном поле по окружности радиусом 4 см со скоростью 1 Мм/с. Индукция магнитного поля 0,3 Тл. Найти заряд частицы, если её кинетическая энергия 12 кэВ.

267. Протон и α -частица влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно его силовым линиям. Определить отношение скоростей этих частиц, если радиус кривизны траектории α -частицы в 4 раза больше радиуса кривизны траектории протона.

268. Протон, обладающий импульсом $3,2 \cdot 10^{-21}$ кг м/с, влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям и движется по окружности радиусом 10 см. Найти индукцию магнитного поля.

269. Протон движется в однородном магнитном поле с напряженностью 100 кА/м по окружности радиусом 2 см. Найти кинетическую энергию протона.

270. Катушка из 100 витков площадью 15 см^2 вращается в однородном магнитном поле с частотой 5 оборотов в секунду. Ось вращения перпендикулярна оси катушки и силовым линиям поля. Определить индукцию магнитного поля, если максимальное значение ЭДС индукции, возникающей в катушке, равно 0,25 В.

271. Проволочный виток диаметром 5 см и сопротивлением 0,02 Ом находится в однородном магнитном поле индукцией 0,3 Тл. Плоскость витка составляет угол 30° с линиями индукции. Какой заряд протечет по витку при выключении поля?

272. Определить разность потенциалов, возникающую на концах вертикальной автомобильной антенны длиной 1,2 м при движении автомобиля с востока на запад в магнитном поле Земли со скоростью 72 км/ч. Горизонтальная составляющая напряженности земного магнитного поля 16 А/м.

273. Проволочный виток диаметром 5 см и сопротивлением 0,04 Ом вращается в однородном магнитном поле с индукцией 0,6 Тл, причем ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна вектору индукции. Определить заряд, который протекает по рамке при изменении угла между нормалью к плоскости рамки и линиями индукции: а) от 0° до 45° ; б) от 45° до 90° .

274. Индукция магнитного поля между полюсами двухполюсного генератора $0,8$ Тл. Ротор имеет 100 витков площадью 400 см^2 . Определить частоту вращения ротора, если максимальное значение ЭДС индукции 200 В ?

275. На концах крыльев самолета размахом 20 м , летящего со скоростью 720 км/ч , возникает разность потенциалов $0,2 \text{ В}$. Определить вертикальную составляющую напряженности магнитного поля Земли.

276. Соленоид длиной 30 см и площадью поперечного сечения 10 см^2 содержит 600 витков. Найти индуктивность соленоида с сердечником из немагнитного материала ($\mu = 1$). Определить среднее значение ЭДС самоиндукции, возникающей при выключении тока в катушке, если сила тока уменьшается от $0,8 \text{ А}$ до нуля за время 150 мкс .

277. При движении железнодорожного вагона на концах его оси, длина которой $1,6 \text{ м}$, возникает разность потенциалов 12 мВ . Определить скорость поезда, если вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли 40 А/м .

278. Соленоид содержит 1500 витков. По обмотке соленоида течет ток силой 2 А . Вычислить энергию магнитного поля соленоида, если магнитный поток через его поперечное сечение равен $0,5 \text{ мВб}$.

279. По обмотке соленоида с числом витков 1500 и площадью поперечного сечения 10 см^2 течет ток, создающий поле с индукцией 20 мТл . Найти среднее значение ЭДС самоиндукции, возникающей в соленоиде, если сила тока уменьшается до нуля за время 1 мс .

280. Со стороны однородного магнитного поля, объемная плотность энергии которого $0,4 \text{ Дж/м}^3$, на проводник, расположенный перпендикулярно силовым линиям поля, действует сила Ампера величиной $0,6 \text{ мН}$. Определить силу тока в проводнике, если длина проводника $0,2 \text{ м}$.

4.1.8. Некоторые сведения, необходимые для решения задач

1. Некоторые физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Ускорение свободного падения	g	$9,81 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная	G	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	R	$8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$

2. Относительные атомные массы (округленные значения)

некоторых элементов

Элемент	Химический символ	A
Азот	N	14
Аргон	Ar	40
Водород	H	1
Гелий	He	4
Кислород	O	16
Неон	Ne	20
Углерод	C	12

3. Масса и заряд некоторых частиц

Частица	Масса, кг	Заряд, Кл
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	$1,60 \cdot 10^{-19}$
Протон	$1,67 \cdot 10^{-27}$	$1,60 \cdot 10^{-19}$
α - частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	$3,20 \cdot 10^{-19}$

4. Удельное сопротивление металлов

Металл	Удельное сопротивление (Ом·м)	Металл	Удельное сопротивление(Ом·м)
Алюминий	$2,8 \cdot 10^{-8}$	Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Железо	$9,8 \cdot 10^{-8}$	Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Нихром	$1,1 \cdot 10^{-6}$	Никелин	$4,0 \cdot 10^{-7}$

5. Единицы физических величин СИ, имеющие собственные наименования

Величина	Единица Наименование	Обозначение
Электрический заряд	кулон	Кл
Сила тока	ампер	А
Потенциал электрического поля, электрическое напряжение	вольт	В
Электрическая емкость	фарад	Ф
Электрическое сопротивление	ом	Ом
Электрическая проводимость	сименс	См
Магнитная индукция	тесла	Тл
Магнитный поток	вебер	Вб
Индуктивность	генри	Гн

6. Некоторые астрономические величины

Наименование	Значение
Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	$5,93 \cdot 10^{24}$ кг
Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$7,33 \cdot 10^{22}$ кг
Расстояние от центра Земли до центра Луны	$3,84 \cdot 10^8$ м
Расстояние от центра Земли до центра Венеры	$6,0 \cdot 10^{10}$ м

4.2. Текущий контроль (тестовые задания)

4.2.1. Тренировочные тесты к разделу 1

Тренировочный тест к теме 1.1

Задание 1 (выберите один из вариантов ответов)

Формула, выражающая, общее определение вектора линейной скорости (\vec{S} – перемещение) имеет вид:

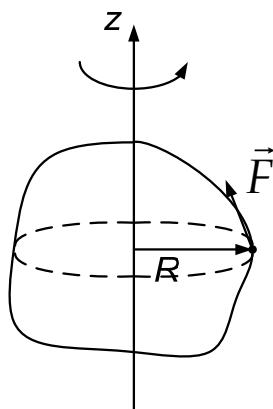
$$1) |\vec{v}| = \frac{|\vec{dr}|}{dt} = \frac{dS}{dt}; \quad 2) \vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}; \quad 3) v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}; \quad 4) \vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Задание 2 . Точка движется прямолинейно согласно уравнению

$X = 3t - \frac{1}{6} t^3$. В момент времени 3 с ускорение равно:

$$1) 1 \text{ м/с}^2; \quad 2) 6 \text{ м/с}^2; \quad 3) -\frac{1}{6} \text{ м/с}^2; \quad 4) -3 \text{ м/с}^2.$$

Задание 3. Твердое тело вращается вокруг неподвижной оси вращения Z , как показано на рисунке.



Угловая скорость в этом случае направлена:

- 1) по касательной к окружности; 2) вдоль оси вращения вверх;
- 3) вдоль оси вращения вниз; 4) по радиусу окружности.

Задание 4. Колесо автомашины вращается равнозамедленно. За время две минуты оно изменило частоту вращения от 240 до 60 мин^{-1} . Угловое ускорение колеса равно:

- 1) -90 с^{-2} ; 2) 90 с^{-2} ; 3) $-9,4 \text{ с}^{-2}$; 4) 3 с^{-2} .

Задание 5. При увеличении в 4 раза радиуса круговой орбиты искусственного спутника Земли его период обращения увеличивается в 8 раз. При этом скорость движения спутника по орбите:

- 1) уменьшается в 2 раза; 2) увеличивается в 2 раза;
- 3) уменьшается в 4 раза; 4) увеличивается в 4 раза.

Тренировочный тест к теме 1.2

Задание 1. 2-й закон Ньютона в самой общей форме выражается формулой:

$$1) \vec{a} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{F}_i}{m}; \quad 2) m \frac{d^2 x}{dt^2} = \vec{F}_{\text{рез}}; \quad 3) m \frac{d^2 x}{dt^2} = \vec{F}_{\text{рез}}; \quad 4) \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}_{\text{рез}}.$$

Задание 2. Тело массой 0,1 кг вдоль оси X согласно уравнению $X = 10t - 10t^2$. При этом результирующая сила, действующая на тело равна:

- 1) -20 Н ; 2) -2 Н ; 3) 1 Н ; 4) 10 Н .

Задание 3. Для выполнения закона сохранения импульса системы тел необходимо выполнение условия:

- 1) внутренние силы должны быть консервативными;
- 2) сумма внутренних сил равна нулю;
- 3) сумма внешних сил равна нулю;
- 4) система тел замкнутая и внутренние силы консервативные.

Задание 4. Шар, движущийся в горизонтальном направлении со скоростью 4 м/с, неупруго сталкивается с неподвижным шаром такой же массы. Скорости шаров после удара равны:

- 1) 4 м/с; 2) 0; 3) 8 м/с; 4) 2 м/с.

Задание 5. Упругая пружина вначале была растянута на 3 см, затем её удлинили ещё на 6 см. В результате её потенциальная энергия увеличилась:

- 1) в 4 раза; 2) в 9 раз; 3) в 3 раза; 4) в 18 раз.

Тренировочный тест к теме 1.3

Задание 1. Однородный диск вращается равноускоренно относительно оси, совпадающей с его осью симметрии. Его угловое ускорение **не зависит** от:

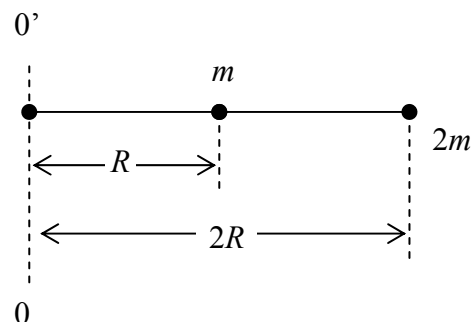
- 1) угловой скорости; 2) момента инерции;
- 3) суммарного момента сил; 4) момента импульса.

Задание 2. Формула основного закона динамики вращательного движения имеет вид:

- 1) $\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]$; 2) $\vec{M} = I\vec{\beta}$; 3) $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$; 4) $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$.

Задание 3. Два шара массой m и $2m$ находятся на невесомом стержне на расстоянии R и $2R$ от оси вращения $00'$ (рис.). Момент инерции этой системы шаров равен:

- 1) $5 mR^2$; 2) $3 mR^2$; 3) $6 mR^2$; 4) $9 mR^2$.



Задание 4. Условия выполнения закона сохранения момента импульса системы тел:

- 1) в системе нет сил трения; 2) система тел замкнутая;
- 3) сумма моментов внешних сил равна нулю;
- 4) внутренние и внешние силы консервативные.

Задание 5. Вращающийся фигурист может изменять свой момент инерции, если выставить руки в стороны или прижать к туловищу. При увеличении момента инерции на 200 % число оборотов:

- 1) уменьшится в 2 раза; 2) увеличится в 3 раза;
- 3) уменьшится в 3 раза; 4) увеличится в 2 раза.

Тренировочный тест к теме 1.4

Задание 1. В жидкости молекулы:

- 1) движутся упорядоченно;
- 2) совершают колебательное и поступательное движения;
- 3) колеблются в различных направлениях;
- 4) совершают вращательное и поступательное движения.

Задание 2. Давление столба жидкости в закрытом сосуде **не зависит** от:

- 1) температуры; 2) высоты столба жидкости или газа;
- 3) плотности жидкости; 4) широты местности.

Задание 3. Скорость движения жидкости и газа зависит от площади поперечного сечения трубы. При уменьшении диаметра трубы в 3 раза скорость течения:

- 1) уменьшается в 3 раза; 2) увеличивается в 3 раза;
- 3) увеличивается в 9 раз; 4) уменьшается в 1,5 раза.

Задание 4. Газ течёт по горизонтально расположенной трубке. При уменьшении диаметра трубки:

- 1) скорость течения убывает, давление возрастает;
- 2) скорость не изменяется, давление убывает;
- 3) скорость возрастает, давление не изменяется;
- 4) скорость возрастает, давление убывает.

Задание 5. Вязкость жидкости при нагревании:

- 1) увеличивается; 2) уменьшается;
3) уменьшается значительно; 4) не изменяется.

4.2.2. Тренировочные тесты к разделу 2

Тренировочный тест к теме 2.1

Задание 1. Установите соответствие между названиями изопроцессов и их законами:

Процесс	Закон
1) изохорный	а) $P_1V_1 = P_2V_2$;
2) изобарный	б) $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$;
3) изотермический	в) $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$;
4) адиабатный	г) $P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma$.

Задание 2. Выберите выражение, представляющее собой уравнение Менделеева-Клайперона:

1) $N = \frac{m}{\mu} N_A$; 2) $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$; 3) $V = V_0(1 + \alpha t)$; 4) $P = \frac{N}{N_A} \frac{RT}{V}$.

Задание 3. Среднюю кинетическую энергию молекулы метана CH_4 определяет выражение:

1) кТ; 2) 1,5 кТ; 3) 2,5 кТ; 4) 3 кТ.

Задание 4. Отношение энергии вращательного движения молекулы метана (NH_3) к её полной кинетической энергии равно:

1) 1/6; 2) 1/2; 3) 2/5; 4) 3/5.

Задание 5. С увеличением температуры многоатомного газа:

- 1) увеличивается число степеней свободы поступательного движения;

- 2) уменьшается количество вращательных степеней свободы;
- 3) появляются колебательные степени свободы;
- 4) увеличивается число поступательных и вращательных степеней свободы.

Тренировочный тест к теме 2.2

Задание 1. Давление атмосферы изменяется при увеличении высоты следующим образом:

- 1) уменьшается экспоненциально;
- 2) уменьшается линейно;
- 3) уменьшается гиперболически;
- 4) увеличивается экспоненциально.

Задание 2. Наименьшей на высоте 2 м от поверхности Земли будет концентрация газа:

- 1) O_2 ;
- 2) N_2 ;
- 3) H_2 ;
- 4) CO_2 .

Задание 3. При повышении температуры:

- 1) увеличивается наивероятнейшая скорость молекул и уменьшается общее количество молекул;
- 2) увеличивается общее количество молекул и растет доля быстрых молекул;
- 3) увеличивается средняя скорость молекул и возрастает доля быстрых молекул;
- 4) уменьшается среднеквадратичная скорость молекул и увеличивается доля быстрых молекул.

Задание 4. При увеличении температуры газа в 2 раза наивероятнейшая скорость увеличится:

- 1) в 2 раза;
- 2) уменьшится в 4 раза;
- 3) увеличится в $\sqrt{2}$ раза;
- 4) уменьшится в 1,7 раза.

Задание 5. Средняя скорость молекул газа:

- 1) меньше наивероятнейшей скорости;
- 2) больше наивероятнейшей;
- 3) больше среднеквадратичной скорости;

4) её значение находится между наивероятнейшей и среднеквадратичной скоростями.

Тренировочный тест к теме 2.3

Задание 1. Явления переноса в газах наблюдаются при нарушении равновесного состояния. Теплопроводность газов обусловлена переносом молекулами:

1) массы; 2) энергии; 3) импульса; 4) момента импульса.

Задание 2. При пониженном атмосферном давлении нагретые тела:

- 1) остывают быстрее; 2) остывают медленнее;
- 3) температура тела не изменяется.
- 4) скорость остывания зависит от разности температур тела и среды.

Задание 3. Длина свободного пробега молекулы – это расстояние,

- 1) на котором скорость молекулы уменьшается до нуля;
- 2) между стенками сосуда, в котором находится газ;
- 3) между последовательными соударениями с другими молекулами;
- 4) среднее расстояние между молекулами при низких температурах.

Задание 4. Диффузия наблюдается:

- 1) только в газах; 2) только в жидкостях; 3) только в твёрдых телах;
- 4) в веществах в любом агрегатном состоянии.

Задание 5. Вакуум – это состояние, при котором:

- 1) длина свободного пробега молекул очень велика;
- 2) длина свободного пробега молекул сравнима с размерами сосуда;
- 3) давление газа меньше 10^{-3} миллиметров ртутного столба;
- 4) давление газа меньше 10^{-9} миллиметров ртутного столба.

Тренировочный тест к теме 2.4

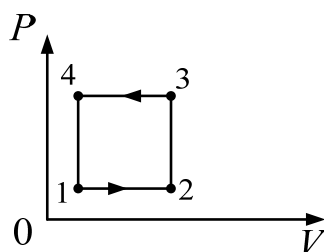
Задание 1. Сообщенная газу теплота, полностью идет на изменение его внутренней энергии в процессе:

- 1) изохорном; 2) изобарном; 3) адиабатном; 4) изотермическом.

Задание 2. При изотермическом сжатии для изменения внутренней энергии идеального газа справедливо соотношение:

- 1) $\Delta U = 0$; 2) $\Delta U > 0$; 3) $\Delta U < 0$.

Задание 3. Для процесса 2-3, изображенного на рисунке, верно выражение:



- 1) $Q = A$; 2) $Q = \Delta U$; 3) $Q = \Delta U + A$; 4) $A = -\Delta U$.

Задание 4. От вида процесса **не зависит**:

- 1) теплоемкость; 2) теплота; 3) изменение внутренней энергии;
4) работа.

Задание 5. Тепловой двигатель работает по обратимому циклу Карно. Температура теплоотдатчика 500 К. КПД цикла 0,3. При этом температура теплоприемника:

- 1) 150 К; 2) 350 К; 3) 250 К; 4) 450 К.

Тренировочный тест к теме 2.5

Задание 1. Признаком перехода реального газа в идеальный является:

- 1) повышение температуры; 2) уменьшение плотности;
3) выполнение закона Менделеева-Клапейрона;
4) уменьшение давления.

Задание 2. Для сжижения газа необходимо:

- 1) резко повысить давление;
- 2) охладить газ ниже критической температуры;
- 3) резко увеличить объём газа;
- 4) повысить давление при температуре выше критической.

Задание 3. При критической температуре:

- 1) давление газа резко падает;
- 2) исчезают различия между жидкостью и газом;
- 3) жидкость закипает; 4) газ переходит в жидкое состояние.

Задание 4. Уравнение состояния реального газа должно содержать поправки на:

- 1) силы отталкивания между молекулами;
- 2) силы притяжения;
- 3) собственный объём молекул;
- 4) силы притяжения и собственный объём молекул.

Задание 5. Насыщенным является пар:

- 1) находящейся при высокой температуре;
- 2) обладающей повышенной плотностью;
- 3) находящийся в равновесии со своей жидкостью;
- 4) находящийся при низкой температуре.

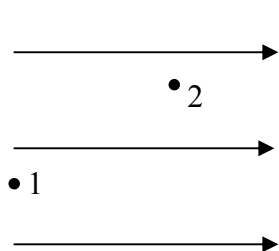
4.2.3. Тренировочные тесты к разделу 3

Тренировочный тест к теме 3.1

Задание 1. Для силовой характеристики электрического поля справедлива формула:

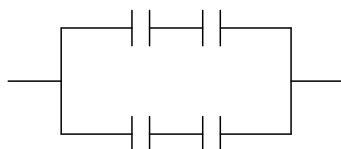
$$1) \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}; \quad 2) E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q|}{r^2}; \quad 3) E = \frac{U}{d}; \quad 4) E = \frac{|\sigma|}{2\epsilon\epsilon_0}.$$

Задание 2. На рисунке изображены силовые линии электростатического поля. Соотношение между напряжённостями (E_1 и E_2) и потенциалами (φ_1 и φ_2) в точках 1 и 2 определяется выражением:



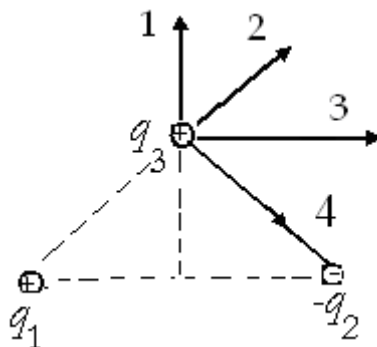
- 1) $E_1 > E_2$, $\varphi_1 > \varphi_2$;
- 2) $E_1 < E_2$, $\varphi_1 < \varphi_2$;
- 3) $E_1 = E_2$, $\varphi_1 > \varphi_2$;
- 4) $E_1 = E_2$, $\varphi_1 < \varphi_2$.

Задание 3. Электроемкость батареи из 4-х одинаковых конденсаторов с электроемкостью 4 мкФ каждый, составляет:



- 1) 16 мкФ; 2) 1/4 мкФ; 3) 1/2 мкФ; 4) 4 мкФ.

Задание 4. На рисунке изображены разноименные одинаковые по величине точечные заряды q_1 и q_2 , в электростатическом поле которых движется точечный заряд q_3 .



Вектор полного ускорения заряда q_3 совпадает с направлением вектора:

- 1) 1; 2) 2; 3) 3; 4) 4.

Задание 5. Потенциал поверхности металлического заряженного шара равен 100 В. Напряженность и потенциал внутри шара соответственно равны:

- 1) 50 В/м и 50 В; 2) 0 и 100 В 3) 100 В/м и 0, 4) 100 В/м и 100 В.

Тренировочный тест к теме 3.2

Задание 1. К диэлектрикам относятся вещества, которые:

- 1) хорошо проводят электрический ток;
- 2) проводят ток при нагревании и освещении;

- 3) не проводят ток;
- 4) являются сверхпроводниками при очень низких температурах.

Задание 2. Из перечисленных ниже веществ к диэлектрикам не относится:

- 1) золото; 2) гранит; 3) пластмасса; 4) дерево.

Задание 3. Если поместить диэлектрик в электрическое поле, на его поверхностях, перпендикулярных внешнему полю, появляются заряды. Причиной появления связанных зарядов является:

- 1) возникновение свободных электронов;
- 2) движение ионов кристаллической решётки;
- 3) возникновение или ориентация дипольных моментов молекул;
- 4) возникновение собственного электрического поля в диэлектрике.

Задание 4. В объёме диэлектрика, находящегося в электрическом поле, вектор напряжённости:

- 1) увеличивается по модулю; 2) уменьшается по модулю;
- 3) не изменяется; 4) изменяет направление на противоположное.

Задание 5. Два заряда q_1 и q_2 , находящихся в воздухе на расстоянии r друг от друга, поместили в жидкость с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$. Сила взаимодействия зарядов не изменится при расстоянии между зарядами в жидкости равном:

- 1) $4r$; 2) $2r$; 3) r ; 4) $r/2$.

Тренировочный тест к теме 3.3

Задание 1. Носителями тока в проводниках являются:

- 1) свободные электроны; 2) положительные ионы;
- 3) отрицательные электроны; 4) положительные ионы и электроны.

Задание 2. Если металлическому проводнику сообщить заряд, то:

- 1) заряд распределится по всему объёму проводника, электрическое поле внутри проводника усилится;

2) заряд распределится по поверхности, поле внутри проводника отсутствует;

3) заряд распределится по поверхности, поле внутри проводника усилится;

4) заряд распределится по всему объёму проводника, электрическое поле внутри проводника отсутствует.

Задание 3. Емкость плоского конденсатора **не зависит**:

1) от напряжения на пластинах; 2) от площади пластин;

3) от расстояния между пластинами;

4) от диэлектрика между пластинами.

Задание 4. Между обкладками конденсатора находится диэлектрик с диэлектрической проницаемостью, равной 7. Если удалить диэлектрик, то ёмкость конденсатора:

1) не изменится; 2) увеличится в 7 раз;

3) уменьшится в 7 раз; 4) уменьшится в 49 раз.

Задание 5. Если напряженность электростатического поля в воздухе увеличить в 2 раза, то объемная плотность энергии...

1) увеличится в 2 раза; 2) увеличится в 4 раза;

3) увеличится в 1,41 раза; 4) не изменится.

Тренировочный тест к теме 3.4

Задание 1. Электрическим током называется:

1) упорядоченное движение любых заряженных частиц или заряженных макроскопических тел;

2) упорядоченное движение электронов;

3) упорядоченное движение ионов;

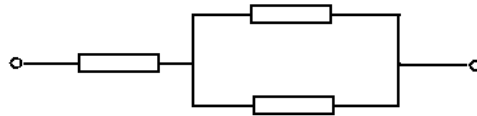
4) хаотическое движение заряженных частиц.

Задание 2. Удельное сопротивление металлического проводника **не зависит** от:

1) температуры; 2) химической природы; 3) напряжения; 4) длины.

Задание 3. Если сопротивления всех резисторов одинаковы и равны 6 Ом, то общее сопротивление изображенного на схеме участка цепи равно:

- 1) 9 Ом; 2) 18 Ом; 3) 2 Ом; 4) 9 Ом.



Задание 4. Сопротивление 12-вольтовой автомобильной лампочки мощностью 40 Вт равно:

- 1) 0,3 Ом; 2) 3,6 Ом; 3) 3,33 Ом; 4) 0,28 Ом.

Задание 5. Источник тока с ЭДС 10 В и внутренним сопротивлением 1 Ом замкнут на резистор сопротивлением 9 Ом. Полезная мощность источника тока равна:

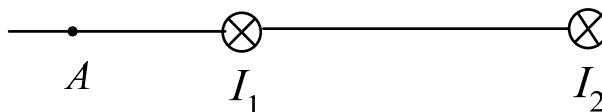
- 1) 9 Вт; 2) 10,8 Вт; 3) 10 Вт; 4) 1 Вт.

Тренировочный тест к теме 3.5

Задание 1. Силовой характеристикой магнитного поля является:

- 1) магнитная индукция; 2) напряженность магнитного поля;
3) намагниченность; 4) магнитный поток.

Задание 2. На рисунке изображено сечение двух прямолинейных бесконечно длинных параллельных проводников с токами, текущими в одном направлении.



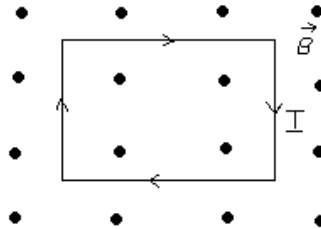
Если в этой точке $H_1 = 5$ А/м и $H_2 = 2$ А, то напряженность магнитного поля в точке A равна:

- 1) 3 А/м; 2) 7 А/м; 3) 10 А/м; 4) 2,5 А/м.

Задание 3. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, будет равна нулю, если угол между направлениями тока и вектора магнитной индукции равен:

- 1) $\pi/3$; 2) $\pi/2$; 3) π ; 4) $1,5\pi$.

Задание 4. На рисунке изображена рамка с током, помещённая в однородное поле. Если линии магнитной индукции поля перпендикулярны плоскости чертежа и направлены к наблюдателю, то рамка будет:



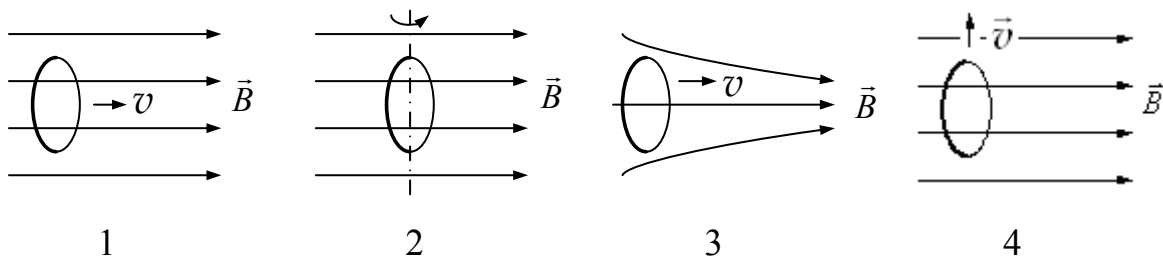
1) растягиваться; 2) сжиматься; 3) поворачиваться вокруг вертикальной оси; 4) поворачиваться вокруг горизонтальной оси.

Задание 5. Если заряженная частица влетает под углом 30° к линиям индукции однородного магнитного поля, то она будет двигаться:

1) по винтовой линии; 2) по окружности; 3) по прямой; 4) по параболе.

Тренировочный тест к теме 3.6

Задание 1. На рисунках изображены различные случаи движения проводочного витка в магнитном поле.



Движение, при котором в проволочке витка **не возникает** ЭДС индукции:

- 1) виток движется поступательно в неоднородном поле;
- 2) виток вращается;
- 3) виток движется поступательно в однородном поле;
- 4) виток выносится за пределы поля.

Задание 2. Поток магнитной индукции через проводочный контур изменяется с течением времени по закону $\Phi = 0,1 \cos 4t$. Максимальное значение ЭДС индукции в контуре равно:

1) 0,4 В; 2) 0,1 В; 3) 0,2 В; 4) 0,025 В.

Задание 3. Условие, при котором ЭДС самоиндукции в соленоиде не возникает:

- 1) по соленоиду протекает постоянный ток;
- 2) по соленоиду протекает переменный ток;
- 3) уменьшается сила тока в соленоиде;
- 4) увеличивается сила тока в соленоиде.

Задание 4. Внутри соленоида, присоединенного к источнику постоянного тока, находится железный сердечник. При удалении сердечника ток в обмотке соленоида:

- 1) изменится направление тока; 2) уменьшится;
- 3) останется без изменения; 4) увеличится.

Задание 5. Энергия магнитного поля вокруг проводника с током уменьшилась в 9 раз из-за того, что сила тока в проводнике уменьшилась в:

- 1) 9 раз; 2) 4,5 раза; 3) 3 раза; 4) в 1,5 раза.

Тренировочный тест к теме 3.7

Задание 1. Система уравнений Максвелла характеризует:

- 1) электростатическое поле; 2) стационарное магнитное поле;
- 3) переменное магнитное поле; 4) электромагнитное поле.

Задание 2. Источником вихревого электрического поля является:

- 1) переменное магнитное поле; 2) постоянное магнитное поле;
- 3) неподвижный электрический заряд;
- 4) движущийся электрический заряд.

Задание 3. Источниками магнитного поля являются:

- 1) только токи проводимости; 2) только переменное электрическое поле;
- 3) токи проводимости и переменное электрическое поле;
- 4) только ускоренно движущиеся заряженные частицы.

Задание 4. Распространение электромагнитного поля осуществляется:

- 1) движением заряженных тел; 2) электромагнитными волнами;
3) движением намагниченных тел; 4) упругими волнами.

Задание 5. Скорость распространения электромагнитных волн в веществе зависит от её:

- 1) плотности; 2) упругих свойств;
3) электрических и магнитных свойств;
4) удельного сопротивления.

4.3. ПРАВИЛЬНЫЕ ОТВЕТЫ НА ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ТЕСТЫ

Раздел	Тема	Номера вопросов/Номера ответов					
1	1.1	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	2	4	2	1	1
	1.2	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	4	2	3	4	1
	1.3	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	1	2	4	3	3
	1.4	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	2	1	2	4	3
2	2.1	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	1в.2б, 3а,4г	4	4	2	3
	2.2	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	1	4	3	3	4
	2.3	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	2	2	3	4	2
	2.4	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	1	1	2	3	2
	2.5	Номер задания	1	2	3	4	5

		<i>Правильный ответ</i>	3	4	2	4	3
3	3.1	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	1	3	4	3	2
	3.2	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	3	1	3	2	4
	3.3	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	1	2	1	3	2
	3.4	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	1	3	4	2	1
	3.5	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	1	2	3	2	1
	3.6	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	3	1	1	4	3
	3.7	Номер задания	1	2	3	4	5
		<i>Правильный ответ</i>	4	1	3	2	3

4.4. Вопросы для подготовки к экзамену

Физические основы механики

1. Понятие механического движения и системы отсчёта. Понятие материальной точки и траектории. Движение поступательное и вращательное. Путь и вектор перемещения. Средние скорость и ускорение.

2. Векторы мгновенных скорости и ускорения как производные радиус-вектора. Единицы измерения скорости и ускорения.

3. Угловая скорость и угловое ускорение. Их направления и единицы измерения. Взаимосвязь линейных и угловых величин скорости и ускорения.

4. Первый закон Ньютона – закон инерции. Инерциальные системы отсчёта. Сила. Масса тела. Второй закон Ньютона.

5. Работа силы, единицы её измерения. Консервативные силы.

6. Средняя и мгновенная мощности, единицы их измерения.

7. Потенциальная энергия. Формулы потенциальной энергии в поле сил тяготения и упругости.

8. Кинетическая энергия. Формулы кинетической энергии для поступательного и вращательного движения.

9. Замкнутые механические системы. Закон сохранения импульса в замкнутой механической системе.

10. Момент силы относительно центра и оси вращения.

11. Величина момента импульса абсолютно твердого тела при его вращении вокруг неподвижной оси.

12. Основной закон динамики вращательного движения.

13. Моменты инерции материальной точки и тела при вращательном движении. Формулы моментов инерции кольца и диска при их вращении вокруг оси, проходящей через центр инерции.

14. Кинетическая энергия вращающегося тела. Кинетическая энергия тела при его качении.

Молекулярная физика и термодинамика

15. Основные положения молекулярно-кинетической теории МКТ. Равновесные состояния и процессы. Их графическое изображение. Понятие идеального газа. Опытные законы идеального газа.

16. Уравнение Менделеева-Клапейрона. Связь давления, концентрации молекул и температуры. Универсальная газовая постоянная и её физический смысл.

17. Механическая работа и теплота. Работа газа при изменении его объема. P-V диаграммы.

18. Первое начало термодинамики. Теплоемкость (полная, молярная, удельная).

19. Применение первого начала к изохорическому процессу. График процесса. Молярная теплоемкость при постоянном объеме. Работа в процессе.

20. Применение первого начала термодинамики к изобарному процессу. График процесса. Молярная теплоемкость при постоянном давлении. Работа в процессе.

21. Применение первого начала термодинамики к изотермическому процессу. График процесса. Работа в изотермическом процессе.

22. Круговые процессы. Тепловая машина. КПД реальной и идеальной тепловой машины.

23. Второе начало термодинамики.

Электричество и магнетизм

24. Электрические заряды, единицы измерения заряда. Закон сохранения заряда в замкнутой системе. Точечные заряды Закон Кулона.

25. Основная силовая характеристика электрического поля – напряженность, единицы ее измерения.

26. Графическое изображение электрических полей. Принцип суперпозиции электрических полей.

27. Потенциал электростатического поля. Единицы его измерения. Определение потенциала через работу и через потенциальную энергию.

28. Потенциал поля точечного заряда. Эквипотенциальные поверхности.

29. Связь напряженности и потенциала. Градиент потенциала. Диэлектрическая проницаемость вещества.

30. Поток вектора напряженности электрического поля. Физический смысл потока. Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме, ее практическое применение.

31. Емкость уединенного проводника, единицы ее измерения. Емкость конденсаторов.

32. Постоянный электрический ток, его характеристики и условия существования. Сторонние силы.

33. Закон Ома в интегральной форме для однородного и неоднородного участка цепи.

34. Закон Ома для замкнутой цепи. Физический смысл электродвижущей силы.
35. Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля-Ленца.
36. Магнитное поле, его источники. Закон Ампера. Определение вектора магнитной индукции. Графическое изображение магнитных полей. Принцип суперпозиции.
37. Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитное поле бесконечного прямого тока. Вихревой характер магнитного поля.
38. Силовое действие со стороны магнитного поля на элемент тока и на рамку с током.
39. Работа по перемещению проводника и контура с током в магнитном поле.
40. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца.
41. Магнитное поле в веществе. Виды магнетиков. Ферромагнетики.
42. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Правило Ленца.
43. Вращение проводящей рамки в однородном магнитном поле. Получение переменной синусоидальной ЭДС и переменного тока.
44. Явление самоиндукции. Индуктивность. Индуктивность соленоида.
45. Взаимная индукция. Трансформатор.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. ИНФОРМАЦИЯ О ДИСЦИПЛИНЕ.....	3
1.1. Предисловие.....	3
1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы.....	5
1.2.1. Содержание дисциплины по ГОСТ.....	5
1.2.2. Объем дисциплины и виды учебной работы.....	6
2. РАБОЧИЕ УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	7
2.1. Рабочая программа.....	7
Введение.....	7
Раздел 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ.....	7
Раздел 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.....	8
Раздел 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ.....	10
Заключение.....	11
2.2. Тематический план дисциплины.....	12
2.2.1. Тематический план дисциплины для студентов очно-заочной формы обучения.....	12
2.2.2. Тематический план дисциплины для студентов заочной формы обучения.....	13
2.3. Структурно-логическая схема дисциплины.....	15
2.4. Временной график изучения дисциплины.....	15
2.5. Практический блок.....	16
2.5.1. Лабораторные работы.....	16
2.5.1.1. Лабораторные работы для студентов очно-заочной формы обучения.....	16
2.5.1.2. Лабораторные работы для студентов заочной формы обучения.....	16
2.6. Рейтинговая система оценки знаний при использовании ДОТ.....	17
3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ ДИСЦИПЛИНЫ.....	17
3.1. Библиографический список.....	17

3.2. ОПОРНЫЙ КОНСПЕКТ.....	19
ВВЕДЕНИЕ.....	19
Раздел 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ.....	19
1.1. Элементы кинематики материальной точки и вращательного движения твёрдого тела.....	21
1.1.1. Система отсчета. Траектория.....	21
1.1.2. Скорость.....	22
1.1.3. Ускорение.....	24
1.1.4. Кинематика вращательного движения.....	27
1.2. Динамика материальной точки и системы материальных точек.....	28
1.2.1. Законы Ньютона.....	34
1.2.2. Силы в природе и технике.....	31
1.2.3. Законы сохранения.....	33
1.2.4. Работа силы. Мощность.....	35
1.2.6. Механическая энергия.....	37
1.2.8. Закон сохранения механической энергии.....	39
1.3. Элементы динамики вращательного движения твёрдого тела.....	40
1.3.1. Момент силы.....	40
1.3.2. Момент импульса.....	42
1.3.3. Основное уравнение динамики вращательного движения.....	43
1.3.4. Момент инерции.....	44
1.3.5. Закон сохранения момента импульса.....	45
1.3.6. Работа и кинетическая энергия при вращательном движении.....	46
1.4. Элементы механики жидкости и газа.....	46
Раздел 2. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.....	46
2.1. Кинетические явления и теория идеальных газов.....	49
2.1.1. Уравнение состояния идеального газа. Изопроцессы.....	49
2.1.2. Основное уравнения молекулярно-кинетической теории.....	51
2.1.3. Закон равномерного распределения энергии молекулы по степеням свободы.....	52

2.2. Основы классической статистической физики.....	53
2.2.1. Распределение молекул газа по скоростям.....	53
2.3. Явления переноса в неравновесных состояниях.....	54
2.4. Основы термодинамики.....	54
2.4.1. Внутренняя энергия.....	55
2.4.2. Работа.....	56
2.4.3. Теплота. Теплоёмкость.....	56
2.4.4. Первое закон термодинамики.....	57
2.4.5. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам.....	58
2.4.6. Энтропия.....	60
2.4.7. Второе закон термодинамики.....	61
2.4.8. Тепловые машины.....	62
2.5. Реальные газы и жидкости.....	63
Раздел 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ.....	64
3.1. Электрическое поле в вакууме.....	64
3.1.1. Основные положения электростатики.....	64
3.1.2. Напряженность электростатического поля. Принцип суперпозиции полей.....	66
3.1.3. Циркуляция вектора напряженности электрического поля. Потенциал поля.....	68
3.1.4. Связь между напряженностью и разностью потенциалов.....	71
3.1.5. Теорема Гаусса и её применение для расчёта электростатических полей.....	71
3.2. Электрическое поле в диэлектриках.....	73
3.2.1. Поляризация диэлектриков.....	73
3.2.2. Электрическое поле в диэлектриках.....	74
3.3. Проводники в электрическом поле.....	75
3.3.1. Влияние проводника на электрическое поле.....	75
3.3.2. Электрическое поле заряженного проводника. Электроёмкость.....	76
3.3.3. Энергия электростатического поля.....	77

3.4. Стационарные токи.....	78
3.4.1. Электрический ток и его характеристики.....	78
3.4.2. Закон Ома для однородного участка цепи.....	80
3.4.3. Электродвижущая сила источника тока. Закон Ома для неоднородного участка цепи.....	81
3.4.4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца.....	83
3.5. Магнитное поле в вакууме и в веществе.....	84
3.5.1. Вектор магнитной индукции. Вектор напряженности магнитного поля.....	85
3.5.2. Закон Био-Савара-Лапласа.....	86
3.5.3. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции.....	89
3.5.4. Частицы и токи в магнитном поле.....	90
3.6. Электромагнитная индукция.....	92
3.6.1. Явление и основной закон электромагнитной индукции.....	92
3.6.2. Энергия магнитного поля.....	94
3.7. Уравнение Максвелла. Заключение.....	95
3.3. ГЛОССАРИЙ.....	97
4. БЛОК КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	103
4.1. Методические указания к выполнению контрольных работ.....	103
4.1.1. Общие требования к оформлению контрольных работ.....	103
4.1.2. Методические указания к выполнению контрольной работы № 1...	104
4.1.3. Примеры решения задач.....	105
4.1.4. Задание на контрольную работу № 1.....	120
4.1.5. Методические указания к выполнению контрольной работы № 2...	129
4.1.6. Примеры решения задач.....	130
4.1.7. Задание на контрольную работу № 2.....	142
4.1.8. Некоторые сведения, необходимые для решения задач.....	153
4.2. Текущий контроль (тестовые задания).....	155
4.2.1. Тренировочные тесты к разделу 1.....	155
4.2.2. Тренировочные тесты к разделу 2.....	159

4.2.3. Тренировочные тесты к разделу 3.....	163
4.3. Правильные ответы на тренировочные тесты.....	170
4.4. Вопросы для подготовки к экзамену.....	171

Валентина Павловна Дзекановская

ФИЗИКА. ЧАСТЬ 1
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Редактор Ю.Ю. Студентова

Сводный темплан 2009 г.

Лицензия ЛР N 020308 от 14.02.97.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 78.01.07.953.П.005641.11.03

Подписано в печать

Формат 60 x 84 1/16

Б. кн. - журн. П. л. 10,75

Б.л. 5,5 Изд-во СЗТУ.

Тираж 150 экз.

Заказ

Северо-Западный государственный заочный технический университет
Издательство СЗТУ, член Издательско-полиграфической ассоциации
университетов России
191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 5