Министерство образования и науки Российской Федерации
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Ю.П. Кочкин

ФИЗИКА

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Магнитогорск
2015

УДК 53 (075.8)

Рецензенты:

Начальник лаборатории неразрушающего контроля
ЗАО МНТЦ «Диагностика»
С.В. Дурасов

Начальник лаборатории дефектоскопии и радиационной
безопасности НТЦ ОАО «ММК»
О.Ю. Шефер

Кочкин, Ю.П.
Физика: учеб. пособие / Ю.П. Кочкин. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 55 с.

В пособии представлен материал для практических и лабораторных работ, которые необходимо выполнить согласно образовательному стандарту в рамках односеместрового курса по дисциплине «Физика». Темы рефератов охватывают весь курс общей физике.

Предназначено для обучающихся заочного отделения направлений 260100, 100800.

УДК 53 (075.8)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Занятия по физике в группах специальностей 260100 и 100800 начинаются в зимнюю сессию 1 курса. В этот период студенты в соответствии с учебным расписанием:

а) слушают краткий теоретический лекционный курс;

б) выполняют, оформляют и защищают лабораторные работы.

Программа лекционного курса

1. Методы описания физических явлений.
   1.1. Основы классической механики.
   1.2. Основы релятивистской механики.
   1.3. Основы квантовой механики.
   1.4. Основы статистической физики.
   1.5. Физические основы термодинамики.
   1.6. Законы сохранения.
2. Структура материи.
   2.1. Основные свойства гравитационного, электростатического, магнитостатического и электромагнитного полей.
   2.2. Электромагнитные волны и их источники.
   2.3. Свет. Основные световые явления.
   2.4. Элементарные частицы.
   2.5. Состав и свойства ядер атомов.
   2.6. Атомы, состояние электронов в атомах.
   2.7. Характеристика агрегатных состояний вещества: газ, плазма, жидкость, твердое тело.

Лабораторные работы. Лабораторный практикум включает в себя следующие работы:

№1 «Применение законов сохранения для определения скорости полета пули».

№21 «Исследование электростатического поля».

№42 «Определение номеров электронных орбит, соответствующих наблюдаемым линиям в спектре излучения водорода».

Инструкции к лабораторным работам приведены в данном пособии.

До начала лабораторных занятий студентам рекомендуется подробно изучить инструкции всех этих лабораторных работ и подготовить конспекты, состоящие из теоретического введения и последовательности выполнения эксперимента (такие конспекты являются началом отчета по каждой лабораторной работе, которые необходимо будет написать каждому студенту по результатам лабораторных экспериментов).

Контрольные работы. После выполнения лабораторных экспериментов, оформления отчетов и защиты всех лабораторных работ преподаватель выдает каждому студенту индивидуальное задание на выполнение в течение последующего семестра контрольной работы по физике. Номера контрольных заданий приведены в таблице.

Контрольная работа содержит:

1) Реферат по одному теоретическому вопросу в объеме, соответствующему приблизительно 4–5 страницам машинописного текста формата А4.

Реферат должен представлять собой личное краткое обобщенное изложение информации, предусмотренной его формулировкой. Перепечатывание оригинального текста из учебников, пособий и т.п. не допускается. Такой «реферат» оцениваться не будет. Перечень тем рефератов приведен в таблице вариантов заданий для контрольной работы.

2) Решение (с подробными пояснениями) семи задач по разным физическим темам. Номера этих задач по вариантам приведены в таблице, а тексты условий задач можно найти далее в разделах 1-7. К задачам перед каждым разделом изложен минимальный теоретический материал, необходимый для решения соответствующей задачи, и приведен пример решения типовой задачи по данной теме.

Контрольная работа выполняется студентом в течение 2 семестра и сдается на проверку лектору не позднее, чем за 10 дней до начала сессии. Проверенную работу необходимо забрать до зачета и поработать над замечаниями, сделанными проверяющим преподавателем.

В летнюю сессию 1-го курса студенты сдают экзамен по физике. Допуском к экзамену являются: 1) выполненные, оформленные и зачтенные лабораторные работы; 2) зачтенная контрольная работа.

Литература, которая необходима для выполнения лабораторных и контрольной работ, приведена в библиографическом списке.

ТАБЛИЦА ВАРИАНТОВ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Номер (вариант) контрольной работы	Номер реферата	Номер задачи						
		1	2	3	4	5	6	7
1	4	1.5	2.7	3.20	4.4	5.15	6.13	7.14
2	16	1.12	2.17	3.10	4.11	5.4	6.20	7.1
3	8	1.17	2.8	3.5	4.18	5.13	6.7	7.8
4	18	1.4	2.18	3.15	4.5	5.2	6.14	7.15
5	10	1.11	2.9	3.19	4.12	5.20	6.1	7.2
6	13	1.20	2.19	3.9	4.19	5.1	6.8	7.9
7	5	1.3	2.10	3.4	4.6	5.17	6.15	7.16
8	20	1.10	2.20	3.14	4.13	5.3	6.2	7.3
9	1	1.16	2.1	3.18	4.20	5.19	6.9	7.10
10	17	1.2	2.11	3.8	4.7	5.5	6.16	7.17
11	14	1.9	2.2	3.3	4.14	5.11	6.3	7.4
12	11	1.15	2.12	3.13	4.1	5.9	6.10	7.11
13	7	1.1	2.3	3.17	4.8	5.14	6.17	7.18
14	2	1.8	2.13	3.7	4.15	5.7	6.4	7.5
15	19	1.19	2.4	3.2	4.2	5.16	6.11	7.12
16	15	1.14	2.14	3.12	4.9	5.6	6.18	7.19
17	6	1.7	2.5	3.16	4.16	5.18	6.5	7.6
18	12	1.18	2.15	3.6	4.3	5.8	6.12	7.13
19	3	1.13	2.6.	3.1	4.10	5.12	6.19	7.20
20	9	1.6	2.16	3.11	4.17	5.10	6.6	7.7

ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

1. Основы классической механики: законы Ньютона, преобразования Галилея, принцип относительности. Области и границы применимости классической механики.

2. Основы релятивистской механики: постулаты Эйнштейна, преобразования Лоренца. Области и границы применимости релятивистской механики.

3. Основы квантовой механики: волновые свойства частиц, соотношения неопределенностей, уравнение Шредингера. Области и границы применимости квантовой механики.

4. Виды сил и взаимодействий в природе. Примеры сил разной природы.

5. Законы сохранения и условия их выполнимости. Примеры.

6. Сущность и принципы статистического метода в молекулярной физике. Функции распределения молекул по различным параметрам.

7. Явления переноса: диффузия, теплопроводность, внутреннее трение и их уравнения. Физические причины и объяснение этих явлений.

8. Первое начало термодинамики и его смысл. Принципы вычисления внутренней энергии, количества тепла и работы в разных процессах.

9. Второе начало термодинамики и его смысл. Энтропия. Вычисление изменения энтропии в разных процессах.

10. Гравитационное поле, его источники, особенности и количественные характеристики. Принцип эквивалентности.

11. Электрическое поле, его источники, особенности и количественные характеристики. Геометрическое изображение. Способы вычисления.

12. Магнитное поле, его источники, особенности и количественные характеристики. Геометрическое изображение. Способы вычисления.

13. Электромагнитная и магнитоэлектрическая индукция. Электромагнитное поле. Уравнения Максвелла в интегральной форме и их смысл.

14. Электропроводность металлов (электронная теория проводимости). Законы цепей постоянного тока (Ома, Джоуля–Ленца, Кирхгофа).

15. Электромагнитные волны. Шкала ЭМВ. Основные диапазоны шкалы ЭМВ и их источники.

16. Основные световые явления (поляризация, интерференция, дифракция, дисперсия, фотоэффект). Их краткое описание и примеры проявления.

17. Боровская теория атома водорода. Состояние электрона в атоме, квантовые числа. Излучение атома водорода. Формула Бальмера.

18. Состав и свойства ядер атомов. Дефект массы и энергия связи ядер. Принципы ядерной энергетики.

19. Радиоактивность. Виды распадов и излучений. Закон радиоактивного распада. Период полураспада. Активность радиоактивного элемента.

20. Элементарные частицы и их классификация. Основные физические характеристики частиц.

Лабораторная работа №1
ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОЛЕТА ПУЛИ

Цель работы: проведение экспериментального определения скорости полета пули с использованием законов сохранения импульса, механической энергии и момента импульса.

Общие сведения. Физические основы эксперимента

Для описания физических процессов в данной лабораторной работе используются следующие законы:

1. Закон сохранения импульса: если на систему тел не действуют внешние силы (такая система называется **замкнутой**) или их векторная сумма равна нулю, то суммарный импульс системы остается постоянным.

Если $\sum \vec{F}_i = 0$, то $\sum \vec{p}_i = const$.

Если сумма внешних сил не равна нулю, но равна нулю проекция всех сил на какое-либо направление, то сохраняется проекция суммарного импульса на это направление.

Если $\sum \vec{F}_{xi} = 0$, то $\sum \vec{p}_{xi} = const$.

2. Закон сохранения механической энергии: если в замкнутой системе между телами действуют только консервативные силы (силы упругости, тяжести, кулоновские), то полная механическая энергия системы (сумма кинетических и потенциальных энергий всех тел) остается постоянной.

Если в системе есть диссипативная сила (трение, пластическая деформация), то уменьшение полной механической энергии равно работе этой силы. Часть механической энергии, равная работе диссипативной силы, переходит при этом в тепловую энергию.

Далее мы покажем, как применить эти законы сохранения в данном лабораторном эксперименте и как использовать полученные уравнения для определения скорости полета пули.

На рис. 1 показаны последовательные состояния системы «пуля + маятник» после выстрела:

2.1. Пружина пистолета сжата, пуля лежит в стволе. Полная механическая энергия E_1 равна потенциальной энергии $E_{П1}$ сжатой пружины. Кинетическая энергия системы $E_{К1} = 0$.

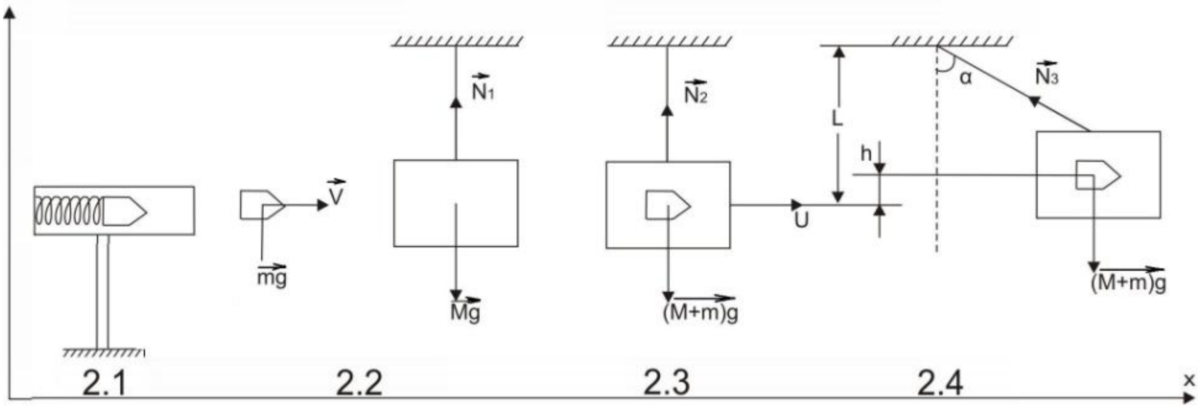


Рис. 1

2.2. Пуля после выстрела летит к маятнику. Полная энергия системы равняется кинетической энергии пули:

$$E_2 = E_K(\text{пули}) = \frac{m \cdot V^2}{2}.$$

Импульс системы равен импульсу пули:

$$p_2 = m \cdot V,$$

где m – масса пули;

V – скорость пули.

В нашем рассмотрении мы пренебрегаем небольшой вертикальной составляющей скорости, возникающей из-за действия силы тяжести.

2.3. Пуля застряла в маятнике (неупругий удар). Маятник, получив удар, приобретает скорость U и начинает отклоняться от положения равновесия. Часть кинетической энергии пули уходит на работу по деформации пластилина. Полная механическая энергия уменьшилась и стала равной

$$E_3 = E_K(\text{пуля} + \text{маятник}) = \frac{(m+M) \cdot U^2}{2}.$$

Импульс системы

$$p_3 = (m+M) \cdot U,$$

где M – масса маятника;

U – скорость маятника сразу после удара пули.

2.4. Маятник с пулей отклонился на угол α, центр тяжести поднялся на высоту h. Кинетическая энергия в верхней точке равна нулю. Полная энергия состоит только из потенциальной:

$$E_4 = (m + M) \cdot g \cdot h.$$

Из рис. 1 состояние (2.4): $\cos\alpha = \dfrac{L - h}{L}$,

$$h = L \cdot (1 - \cos\alpha) = 2 \cdot L \cdot \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

При малых углах $(\alpha < 10^0)$ можно считать $\sin\dfrac{\alpha}{2} = \dfrac{\alpha}{2} = \dfrac{d}{2 \cdot L}$,

Тогда
$$h = \frac{d^2}{2 \cdot L}, \qquad (1)$$

Рассмотрим состояния 2.2 и 2.3 (до и после удара). Полная энергия при переходе от 2.2 к 2.3 не сохраняется, однако сохраняется импульс системы в проекции на горизонтальное направление, т.к. проекции силы тяжести и силы натяжения нити (внешние силы) на это направление равны нулю:

$$p_2 = p_3 \text{ или } m \cdot V = (m + M) \cdot U,$$

отсюда

$$V = \frac{m + M}{m} \cdot U. \qquad (2)$$

Рассмотрим состояния 2.3 и 2.4. Поскольку сила трения на маятник не действует, то по закону сохранения энергии $E_3 = E_4$,
или

$$\frac{m + M}{2} \cdot U^2 = (m + M) \cdot g \cdot h.$$

Отсюда

$$U = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}. \qquad (3)$$

Подставив (1) в (3) и (3) в (2) получим:

$$V = \frac{m+M}{m} \cdot \sqrt{\frac{g}{l}} \cdot d \,. \qquad (4)$$

Формула (4) используется для экспериментального определения скорости полета пули V в данной лабораторной работе.

Описание лабораторной установки и оборудования

Баллистический маятник – это коробка 1, заполненная пластилином, подвешенная на четырех длинных нитях (на рис. 2 нити изображены не в масштабе).

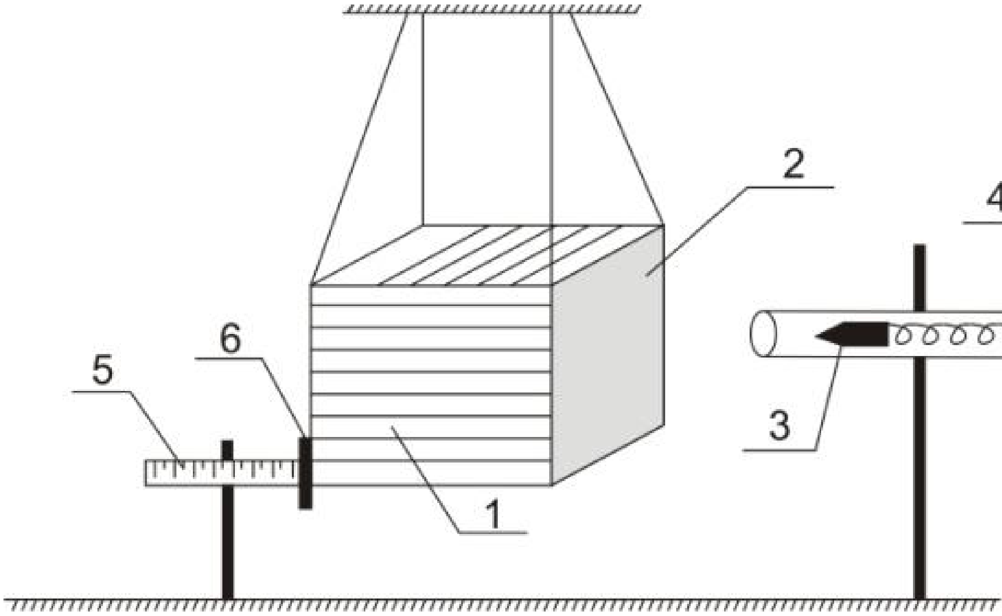


Рис. 2

Боковая поверхность пластилина 2 открыта, так что там может застревать пуля 3, выстреливаемая из пружинного пистолета 4. После выстрела маятник вместе с пулей отклоняется на некоторый угол и передвигает движок 6, установленный на линейке 5. Масса пули значительно меньше массы маятника, поэтому угол отклонения мал. Массу маятника можно увеличивать, вкладывая в коробку металлические пластины известной массы.

Порядок выполнения работы и обработки экспериментальных данных

1. Записать данные установки m, M, L в таблицу.

Данные установки	Номер выстрела	Смещение движка d_i	Среднее смещение $\langle d \rangle$	Средняя скорость $\langle V \rangle$
$m =$	1			
	2			
$M =$	3			
	…	…		
$L =$	…	…		
	N			

2. Сжать пружину пистолета и вложить пулю в ствол до касания с пружиной.

3. Установить пистолет против центра мишени, установить движок на линейку до касания с маятником и заметить его положение по шкале.

4. Произвести выстрел; проследить, чтобы пуля застряла в маятнике. Записать величину смещения движка d.

5. Вернуть движок обратно, зарядить пистолет и произвести последующий выстрел из того же положения (не сдвигать пистолет). Всего произвести N = 10–20 выстрелов, по указанию преподавателя. Занести результаты измерений в таблицу.

6. Рассчитать среднее значение смещения $\langle d \rangle$ и занести его в таблицу.

7. Вычислить среднюю скорость пули по формуле

$$\langle V \rangle = \frac{m+M}{m} \cdot \sqrt{\frac{g}{l}} \cdot \langle d \rangle$$

и занести его в таблицу.

8. По указанию преподавателя эксперимент можно провести ещё раз, увеличив массу маятника. В этом случае сравните два значения скорости полёта пули и сделайте выводы.

Лабораторная работа №21
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Цель работы: изучение геометрии электростатического поля и его основных характеристик.

Общие сведения. Физические основы эксперимента

Электрическое поле (ЭП) на микроскопическом уровне образуют электрически заряженные элементарные частицы: электроны (e^-), протоны (p^+), π-мезоны (π^+, π^-) и многие другие. Причем у большинства из них заряд $q=1,6\cdot10^{-19}$Кл (например, у электрона) является **элементарным**, т.е. наименьшим и неделимым (обозначается буквой «е»).

На макроскопическом уровне ЭП образуют электрически заряженные тела, заряд которых обусловлен избытком или недостатком электронов:

$$Q = \pm N\cdot e,$$

где N – количество избыточных (тогда заряд тела отрицательный) или недостающих (тогда заряд тела положительный) электронов в объеме тела.

Поле вокруг заряженных тел непрерывно, монотонно меняется от точки к точке, интенсивность его плавно уменьшается по мере удаления от источника (заряженного тела). ЭП является посредником взаимодействия заряженных тел и частиц. Если ЭП в каждой точке пространства не изменяется со временем, то его называют **электростатическим**.

Физические поля (электрическое, магнитное) не оказывают непосредственного физиологического действия на человека. Поэтому для их обнаружения и исследования используются так называемые **пробные тела –** это такие тела, на которые поля как-то воздействуют и это воздействие наблюдается человеком. Для исследования ЭП используется пробный заряд **+q_0**: положительно заряженное точечное тело с очень малым по величине зарядом.

Для количественной оценки ЭП вводятся специальные физические величины, характеризующиеся числом интенсивности поля в данной точке (количественные, точечные характеристики). К ним относятся:

- **напряженность** ЭП $\left[\frac{Н}{Кл}=\frac{В}{м}\right]$ – сила F, действующая на единицу пробного заряда в данной точке поля:

$$\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (1)$$

Это силовая, векторная характеристика поля. Вектор $\vec{E}$ направлен в поле от положительных зарядов к отрицательным;

- **потенциал** ЭП $[В]$ – потенциальная энергия W, приходящаяся на единицу пробного заряда в данной точке поля:

$$\varphi=\frac{W}{q_0}. \quad (2)$$

Это энергетическая скалярная характеристика поля. Алгебраический знак φ определяется знаком заряда тела, которое создает ЭП.

Так как и напряженность E, и потенциал φ количественно характеризуют один и тот же физический объект (ЭП), то между ними есть связь:

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta\ell}, \qquad (3)$$

где $\Delta\varphi$ – разность потенциалов между двумя точками ЭП, лежащими на линии вектора $\vec{E}$ на расстоянии $\Delta\ell$ друг от друга. Знак «минус» показывает, что вектор напряженности направлен в сторону убыли потенциала.

ЭП может быть изображено геометрически. Для этого используют:

• **силовые линии** (или линии вектора $\vec{E}$, или линии напряженности) – это такие линии, в каждой точке которых вектор напряженности направлен по касательной. Эти линии имеют направление: они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных

• **эквипотенциальные линии** (или линии потенциала φ) – это линии, в каждой точке которых потенциал имеет одно и то же значение. Эти линии не имеют начала и конца, они замкнутые.

Силовые и эквипотенциальные линии перпендикулярны друг другу в любой точке ЭП.

На рис. 1 для примера показана геометрия некоторых ЭП. Сплошными линиями изображены линии напряженности, а пунктирными – эквипотенциальные линии.

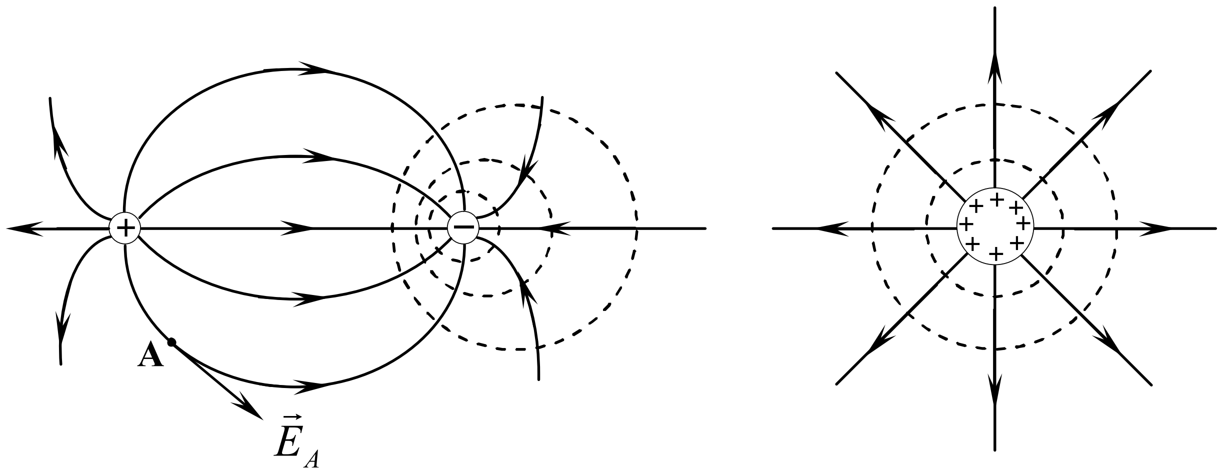


Рис. 1

Описание лабораторной установки и оборудования

Исследование электростатического поля в данной лабораторной работе производится на модели, реально представляющей из себя поле постоянного тока в слабопроводящей среде (рис. 2). К графитизированной бумаге прижаты разные по форме плоские медные электроды **Э**, которые подключены к источнику постоянного тока. Линии тока, текущего через бумагу от одного электрода к другому, соответствуют линиям напряженности ЭП, если бы оно было образовано этими электродами как электрически заряженными телами. Вольтметр **V**, входящий в состав лабораторной установки, может измерять разность потенциалов $\Delta\varphi$ между одним из электродов и произвольной точкой **А** на поверхности бумаги.

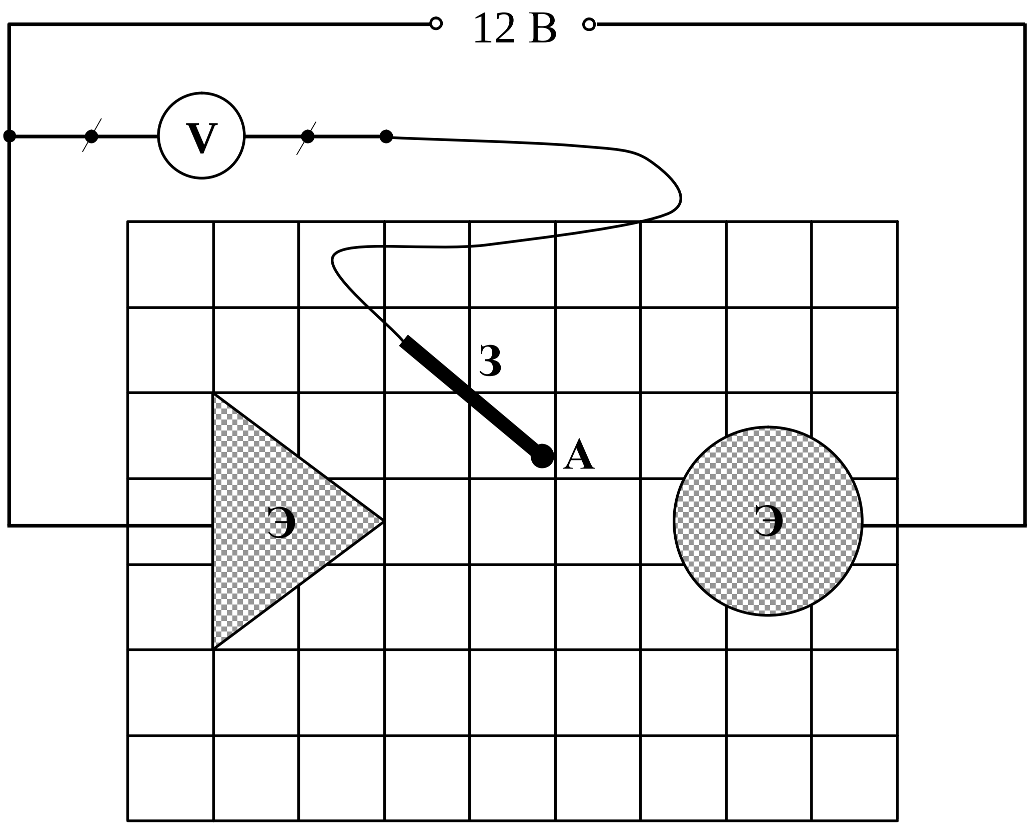


Рис. 2

В дальнейшем мы «забудем» о том, что лабораторная установка имеет модельный характер и будем считать, что электроды **Э** – это тела, имеющие противоположные электрические заряды, которые образуют ЭП. Потенциал левого на рис. 2 электрода, к которому подключен вольтметр, примем равным нулю (этому есть физические обоснования). Тогда с помощью зонда **З**, соединенного с другой клеммой вольтметра, при соприкосновении его с графитизированной бумагой в некоторой точке А можно измерить потенциал электрического поля в этой точке. Измеряя потенциалы исследуемого ЭП в разных точках, можно построить эквипотенциальные линии, а по ним и линии напряженности, т.е. получить полную информацию о геометрии поля.

Порядок выполнения работы и обработки экспериментальных данных

1. Начертить на листе тетрадной бумаги в масштабе 1:1 клеточное поле графитизированной бумаги лабораторной установки и точное положение электродов на нем.

2. Построить по заданию преподавателя 4–5 эквипотенциальных линий «заполняющих» равномерно ЭП между электродами. Для построения одной линии необходимо зондом **3** найти положение 5–7 точек, имеющих одинаковые значения потенциала, расположенных симметрично относительно каждого электрода, и соединить эти точки плавной линией. Рекомендуется две из этих эквипотенциальных линий построить вблизи каждого электрода.

3. По построенной «картине» эквипотенциальных линий определить, какой из электродов имеет положительный и какой отрицательный заряды.

4. Построить вручную 3–5 силовых линий ЭП (по заданию преподавателя), «заполняющих» равномерно область существования исследуемого ЭП. Силовые линии должны проходить перпендикулярно эквипотенциальным линиям и поверхностям электродов и направлены от положительно заряженного электрода к отрицательному.

5. В двух точках А и В по заданию преподавателя рассчитать по формуле (3) напряженность ЭП.

6. Построить векторы напряженности $\vec{E}_A$ и $\vec{E}_B$ в точках А и В (длины этих векторов должны соответствовать соотношению модулям E_A и E_B).

7. Обсудить полученные данные и сделать выводы.

Лабораторная работа № 42
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОМЕРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ОРБИТ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ НАБЛЮДАЕМЫМ ЛИНИЯМ В СПЕКТРЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

Цель работы: изучение процессов, происходящих в атоме водорода при излучении.

Общие сведения. Физические основы эксперимента.

Физические свойства и поведение электронов в атомах могут быть описаны только в рамках квантовой механики, т.к. электроны в этих условиях проявляют ярко выраженные волновые свойства. В частности, применение методов квантовой механики (задача решается исходя из уравнения Шредингера) для электрона в атоме водорода показывает, что все физические характеристики электрона квантуются (т.е. могут принимать только строго определенные числовые значения): скорость, момент импульса, «радиус орбиты» и т.д. Например, энергия электрона определяется формулой

$$E = -\frac{e^4 m}{8h^2\varepsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \qquad (1)$$

где e – заряд электрона;

m – масса электрона;

h – постоянная Планка;

ε_0 – электрическая постоянная;

n – главное квантовое число (номер орбиты электрона), которое может иметь значения n=1, 2, 3, 4…..

Так как

$$\frac{e^4 m}{8h^2\varepsilon_0^2} = \frac{\left(1{,}6\cdot10^{-19}\right)^4\cdot 9{,}1\cdot10^{-31}}{8\left(6{,}625\cdot10^{-34}\right)^2\cdot\left(8{,}85\cdot10^{-12}\right)^2} = 21{,}7\cdot10^{-19}\,Дж =$$

$$= \frac{21{,}7\cdot10^{-19}}{1{,}6\cdot10^{-19}} = 13{,}6\ эВ,$$

то формулу (1) можно записать в виде:

$$E = -\frac{13{,}6}{n^2}\ \text{эВ}. \qquad (2)$$

То есть энергия электрона в атоме может иметь значения:

– на первой орбите (n=1) E_1= -13,6 эВ;

– на второй орбите (n=2) E_2= -3,6 эВ;

– на третьей орбите (n=3) E_3= -1,5 эВ и т.д.

Эти значения энергии в квантовой механике называют энергетическими уровнями для электрона.

Если внешнее энергетическое воздействие на электрон атома отсутствует, то электрон находится в самом низшем энергетическом (невозбужденном) состоянии (уровне) с E= - 13,6 эВ на первой орбите (n=1). Если электрону каким-либо образом передать энергию (соударение с другим атомом, поглощение фотона и т.д.), то электрон увеличивает свою энергию (возбужденное состояние), переходит на более «высокую» орбиту (на более высокий энергетический уровень).

Предположим, что электрон атома водорода находился первоначально в возбужденном состоянии с энергией E_m на m-й орбите. Это состояние является для электрона неустойчивым, поэтому через ~10^{-6} с он переходит в более «низкое» энергетическое состояние $E_к$ на $к$-ю орбиту, излучая при этом фотон с энергией $E_ф$. По закону сохранения энергии

$$E_ф = E_m - E_k\,. \qquad (3)$$

Если выразить $E_ф = \dfrac{hc}{\lambda}$ (формула Планка), подставить эту формулу в (3), выразить E_m и E_k по формуле (1) и тоже подставить в (3), то после алгебраических преобразований получим:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{e^4 m}{8h^3 c\varepsilon_0^2}\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{m^2}\right).$$

Совокупность постоянных величин $\dfrac{e^4 m}{8h^3 c\varepsilon_0^2} = R = 1{,}1 \cdot 10^7 \dfrac{1}{м}$ называется постоянной Ридберга. С учетом этого

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{m^2}\right). \qquad (4)$$

Полученное выражение (4) называется формулой Бальмера. Она определяет длину волны λ фотона, образованного при переходе электрона в атоме водорода с орбиты номер m на орбиту номер k. Формула показывает, что атомы водорода могут излучать только строго определенные по длине волна λ фотоны.

Если излучение атомарного водорода, которое можно получить нагреванием газа или пропусканием через него электрического тока, направить на призму или дифракционную решетку, то суммарное излучение будет разложено по длинам волн в линейчатый спектр, где каждой линии соответствует строго определенная длина волны λ. Анализ его показывает, что линии спектра образуют отдельные группы (серии) по следующему принципу:

– серия Лаймана. Образуется при переходах электронов с вышестоящих орбит на первую. То есть для этой серии в формуле (4) k=1 и m=2, 3, 4, … Все линии этой серии лежат в ультрафиолетовой части спектра;

– серия Бальмера. Образуется при переходах электронов с вышестоящих орбит на вторую. То есть для этой серии в формуле (4) k=2 и m=3, 4, 5, … Первые несколько линий этой серии находятся в видимой части спектра, остальные – в ультрафиолетовой;

– серия Пашена. Образуется при переходах электронов с вышестоящих орбит на третью. То есть для этой серии в формуле (4) $k=3$ и $m = 4, 5, 6, \ldots$ Вся серия лежит в инфракрасной части спектра.

Остальные серии спектра излучения водорода тоже находятся в инфракрасной области.

Описание лабораторной установки и оборудования

Данный лабораторный эксперимент выполняется на спектроскопе, принцип работы которого демонстрируется рис. 1.

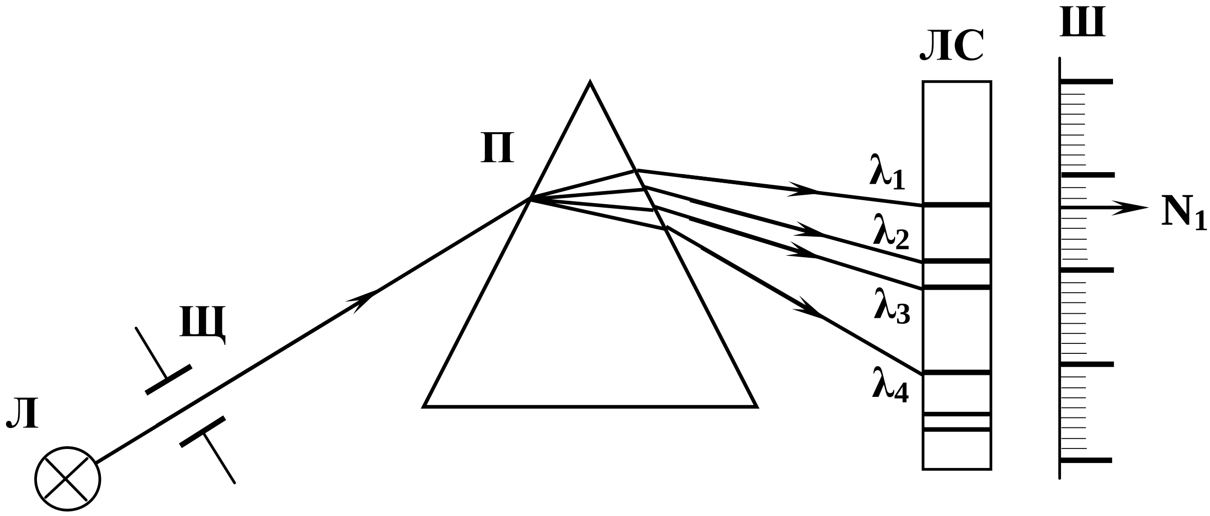


Рис. 1

От излучающей лампы **Л,** системой линз и узкой щелью **Щ** формируется тонкий световой луч, в состав которого входят фотоны с разными длинами волн λ_1, λ_2, λ_3, … Этот луч направляется на призму **П**, которая вследствие дисперсии разлагает падающее излучение по длинам волн. В результате в наблюдаемом проходящем излучении образуется линейчатый спектр **ЛС**, представляющий из себя набор разноцветных (с разными длинными волн) линий. Положение каждой линии спектра можно зафиксировать на шкале **Ш** спектроскопа определенным числом делений **N**.

Порядок выполнения работы и обработки экспериментальных данных

1. Установить на спектроскоп ртутную лампу и включить ее.

2. Для каждой известной по длине волны λ линии в спектре излучения ртути (стандартный ртутный спектр прилагается к лабораторной установке) измерить соответствующее ей число делений шкалы N. Полученные данные занести в таблицу.

λ, нм	694	623,4	579	576,9	546	491,6	435,8	407,8	404,7
N, дел. шк.									

3. Установить на спектроскоп водородную лампу.

4. Для каждой наблюдаемой в спектре излучения водорода линии найти соответствующее ей число делений шкалы спектрометра N_i .

5. По данным таблицы построить график в координатах N-λ, который является градуировочным для шкалы данного спектроскопа.

6. По градуировочному графику N-λ и по измеренным значениям N_i найти длины волн всех наблюдаемых линий в спектре излучения водорода.

7. Учитывая, что наблюдаемые линии в спектре водорода принадлежат серии Бальмера, найти номера орбит **m** (энергетических уровней), с которых переходят электроны при излучении световых фотонов каждой линии спектра. Из формулы (4)

$$m = k \cdot \sqrt{\frac{R\lambda}{R\lambda - k^2}} .$$

8. Проанализировать полученные данные и сделать выводы о том, при каких переходах электронов в атомах водорода (с какой орбиты на какую) образуется каждая наблюдаемая линия спектра излучения.

ЗАДАЧИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Классическая механика. Динамика поступательного и вращательного движения

Основные понятия, величины, законы

1. Масса m, кг, – количественная мера инертности тел, мера гравитационного взаимодействия тел.

Масса однородного тела

$$m = \rho V \ ,$$

где ρ – плотность тела, V – его объем.

2. Сила $\vec{F}$ **,** Н, – количественная мера взаимодействия тел.

3. Импульс $\vec{p}$ **,** кг·м/с, – произведение массы тела на скорость его движения:

$$\vec{p} = m\vec{V} \ .$$

4. Момент инерции J **,** кг·м^2, – мера инертности тела во вращательном движении.

Для материальной точки массой m, вращающейся по окружности радиусом, r,

$$J = mr^2 \ .$$

В общем случае для тела

$$J = \int dm \cdot r^2 \ .$$

Применение этой формулы для вычисления моментов инерции разных тел относительно оси, проходящей через центр масс:

Цилиндр или диск	$J = \frac{1}{2} mr^2$, где r – радиус цилиндра
Стержень	$J = \frac{1}{12} mL^2$, где L – длина стержня
Шар	$J = \frac{2}{5} mR^2$, где R– радиус шара
Полый цилиндр	$J = \frac{1}{2} m\left(r_1^2 + r_2^2\right)$, где r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы цилиндра

Для расчета момента инерции тела относительно оси, не проходящей через центр масс тела, используется теорема Штейнера:

$$J = J_c + ma^2 ,$$

где J_c –момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс тела, a – расстояние между осями.

5. Момент силы $\vec{M}$, Н·м, – векторное произведение радиус-вектора $\vec{r}$, определяющего положение точки приложения силы, на вектор силы $\vec{F}$. В скалярной форме

$$M = rF\sin\alpha ,$$

где α – угол между радиус-вектором и вектором силы.

Для практического вычисления:

$$M = F \cdot h ,$$

где h – плечо силы (кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы).

6. Момент импульса $\vec{L}$, кг·м^2/с, – векторное произведение радиус-вектора $\vec{r}$ на вектор импульса $\vec{p}$. В скалярной форме:

$$L = rp\sin\alpha ,$$

где α – угол между радиус-вектором и вектором импульса.

Для точечного тела, вращающегося по окружности,

$$L = rmV .$$

Для большого вращающегося тела

$$L = J\omega ,$$

где ω – угловая скорость вращения;
J – момент инерции относительно оси вращения.

7. Второй закон Ньютона для поступательно движущегося тела:

$$\Sigma\vec{F}_i = m \cdot \vec{a} \qquad \text{или} \qquad \Sigma\vec{F}_i = \frac{d\vec{p}}{dt} ,$$

где *a* – ускорение тела.

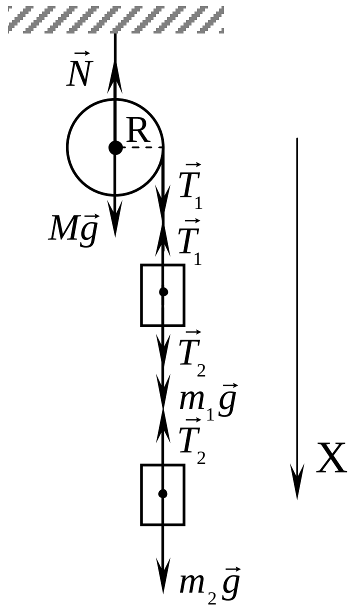
8. Второй закон Ньютона для вращающегося тела (основной закон динамики вращательного движения):

$$\Sigma \vec{M}_i = J \cdot \vec{\varepsilon} \qquad \text{или} \qquad \Sigma \vec{M}_i = \frac{d\vec{L}}{dt},$$

где $\varepsilon = \dfrac{a}{r}$ – угловое ускорение.

Пример решения задачи

Дан блок массой M=2 кг и радиусом R=0,6 м и бруски массами m_1 = 2 кг, m_2 = 3 кг (см. рисунок). Найдите угловое ускорение блока έ и натяжение нити T_2 между 1 и 2 брусками.



Решение

Покажем все силы, действующие на каждое тело системы: Здесь: m_1g, m_2g – силы тяжести брусков, T_1 и T_2 – силы натяжения верхнего и нижнего участков нити, Mg – сила тяжести блока, N – сила реакции опоры (оси блока), действующая на блок.

Второй закон Ньютона для бруска m_2 в проекциях на ось X:

$$m_2g – T_2 = m_2a, \qquad (1).$$

где a – ускорение бруска (a = έ·R).

Второй закон Ньютона для бруска m_1 в проекциях на ось X:

$$m_1g + T_2 – T_1 = m_1a. \qquad (2)$$

Основной закон динамики вращательного движения для блока:

$$M_1 + M_2 + M_3 = I·έ, \qquad (3)$$

где $M_1 = T_1·R$ – момент силы T_1; R – плечо силы T_1 (равное радиусу блока); M_2 и M_3 – моменты сил Mg и N. Так как эти силы проходят через ось вращения, то их плечи равны нулю. Тогда M_2=0, M_3=0. $I = M·R^2/2$ – момент инерции блока. С учетом этого уравнение (3) примет вид $T_1·R = έ·M·R^2/2$.

Отсюда T_1=έ·M·R/2. (4)

Если в уравнение (2) подставить (4), a = ε·R и решить систему уравнений (1) и (2), то получим

$$\varepsilon = \frac{(m_1 + m_2)g}{(m_1 + m_2 + 0{,}5 \cdot M)R} = \frac{(2+3)9{,}8}{(2+3+0{,}5\cdot 2)\cdot 0{,}6} = 13{,}6\ \frac{рад}{c^2}.$$

Из уравнения (1) $T_2 = m_2(g – ε·R) = 3(9{,}8 – 13{,}6·0{,}6) = 4{,}9$ Н.

Задачи для контрольной работы

1.1. На обод маховика диаметром 60 см намотан шнур, к концу которого привязан груз с массой 2 кг. Определить момент инерции маховика, если он вращаясь равноускоренно под действием груза, за время $t=3$ с приобрел угловую скорость 9 рад/с.

Ответ: 1,78 кг·м^2.

1.2. Вал в виде сплошного цилиндра массой $m_1=10$ кг насажен на горизонтальную ось. На цилиндр намотан шнур, к свободному концу которого подвешена гиря массой $m_2=2$ кг. С каким ускорением будет опускаться гиря, если ее предоставить самой себе?

Ответ: 2,8 м/с^2.

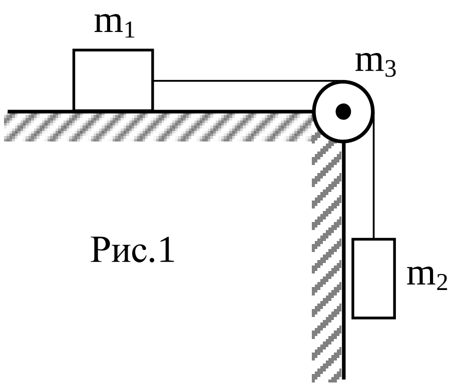


Рис.1

1.3. С какими ускорениями будут двигаться тела в предыдущей задаче и какой будет сила натяжения нити, если в оси цилиндра действует сила трения, создающая тормозящий момент 1,2 Н·м, а радиус цилиндра равен 0,1 м?

Ответ: 2,8 м/с^2.

1.4. Массы грузов, показанных на рис.1, $m_1=1,5$ кг, $m_2=2$ кг, масса блока $m_3=1$ кг. Коэффициент трения между грузом m_1 и горизонтальной поверхностью стола, по которому этот груз движется, равен $\mu=0,2$. С каким ускорением движутся грузы?

Ответ: 8 м/с^2.

1.5. На горизонтальной поверхности стола находится тележка с массой $m_1=5$ кг. К тележке привязали легкую нить, которую перебросили через блок (масса $m_3=2$ кг, радиус 0,1 м), а к концу ее прикрепили гирю с массой $m_2=3$ кг (см. рис. 1). Какую кинетическую энергию будет иметь эта система тел спустя 0,5 с после начала движения? Трением пренебречь.

Ответ: 12,5 Дж.

1.6. На горизонтальной поверхности стола находится тележка с массой $m_1=0,5$ кг. К тележке привязали легкую нить, которую перебросили через блок (масса $m_3=0,2$ кг, радиус 0,1 м), а к концу ее прикрепили гирю массой $m_2=0,3$ кг (см. рис. 1). В оси блока действуют силы трения, создающие тормозящий момент $M_{торм}=0,1$ Н·м. Коэффициент трения между поверхностью стола и тележкой равен $\mu=0,1$. Какую кинетическую энергию будет иметь эта система тел спустя 0,5 с после начала движения?

Ответ: 2,9 Дж.

1.7. На блок массой $m_1=5$ кг и радиусом 10 см намотана нить, к концу которой привязан груз массой $m_2=1$ кг. При поступательном движении груза вниз на вращающийся блок со стороны оси действует сила трения, создающая тормозящий момент $M_{торм}=0,5$ Н·м. С каким ускорением будет при этом опускаться груз?

Ответ: 1,43 м/с^2.

1.8. На вал в виде цилиндра с горизонтальной осью вращения намотана невесомая нить, к концу ее прикреплен груз. Какую угловую скорость будет иметь вал спустя 2 с после начала движения груза, если масса вала 4 кг, его радиус 20 см, масса груза 0,2 кг, действием сил трения на движущиеся тела можно пренебречь.

Ответ: 8,9 рад/с.

1.9. Гиря массой 1 кг опускается вертикально на легкой нити с высоты 0,5 м. Верхняя часть нити намотана на цилиндрический блок массой 0,8 кг и радиусом 0,15 м. Блок вращается вокруг горизонтальной оси, со стороны которой на блок действует сила трения, создающая тормозящий момент $M_{торм}=0,2$ Н·м. Сколько времени до остановки будет вращаться блок после того, как гиря упадет на землю?

Ответ: 0,75 с.

1.10. На цилиндрический блок массой 1 кг с горизонтальной осью вращения намотана невесомая нить, которая переброшена через второй такой же блок, находящийся на одном горизонтальном уровне с первым. К концу нити привязали груз массой 0,8 кг и отпустили. С какими ускорениями будут двигаться тела системы? Какой будет сила натяжения нити между блоками?

Ответ: 4,4 м/с^2; 2,2 Н.

1.11. Найти ответы на вопросы предыдущей задачи, если в осях блоков действуют силы трения, создающие тормозящие моменты по 0,1 Н·м, а радиусы блоков равны 0,1 м.

Ответ: 3,2 м/с^2; 1,6 Н.

1.12. Система тел состоит из грузов с массами $m_1=2$ кг, $m_2=3$ кг , блока в форме цилиндра массой $m_3=4$ кг, закрепленного на вершине наклонной плоскости с углом наклона $\alpha=30^0$ и легкой нерастяжимой нити, которая перекинута через блок и своими концами прикреплена к грузам m_1 и m_2 (рис. 2). Определить ускорение груза m_2 в процессе движения всех тел. Трением пренебречь.

Ответ: 2,8 м/с^2.

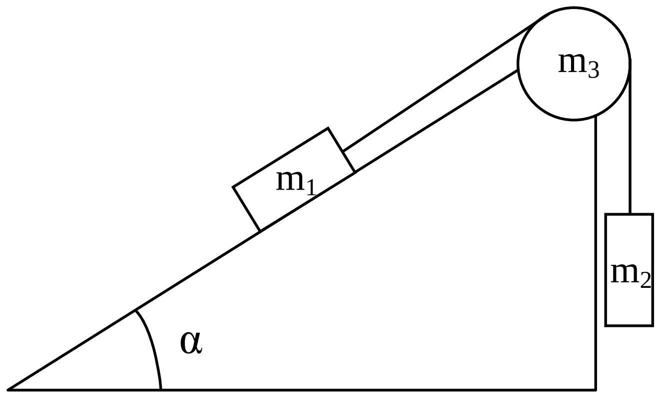


Рис.2

1.13. Каким станет ускорение грузов задачи 1.12, если между телом m_1 и наклонной плоскостью будет действовать сила трения с коэффициентом μ=0,5?

Ответ: 1,6 м/с^2.

1.14. Во сколько раз отличаются силы натяжения вертикального и наклонного участков нити в задаче 1.12 в случаях, когда: 1) трения нет; 2) вдоль наклонной плоскости действует сила трения с коэффициентом μ=0,2?

Ответ: 0,73; 0,67.

1.15. Для системы тел, изображенных на рис. 2, известно, что $\alpha=20^0$, m_1=2 кг, масса блока m_3=2 кг, коэффициент трения между наклонной плоскостью и грузом m_1 равен μ=0,1. Какой по массе груз m_2 нужно прикрепить к вертикальному участку нити, чтобы он двигался с ускорением 1 м/с^2?

Ответ: 1,1 кг.

1.16. Невесомая нить намотана на цилиндр радиусом 30 см и массой 2 кг, переброшена через невесомый блок, находящийся на одном горизонтальном уровне с цилиндром, а к концу ее прикреплена гиря с массой 0,5 кг. Найти кинетические энергии цилиндра и гири через 0,5 с после начала движения системы тел. Трением в осях цилиндра и блока пренебречь.

Ответ: 1,3 Дж; 0,6 Дж.

1.17. Через блок в виде однородного сплошного цилиндра с горизонтальной осью вращения массой 160 г перекинута невесомая нить, к концам которой подвешены грузы массами 200 и 300 г. Пренебрегая трением в оси блока, определить ускорения грузов и силы натяжения нитей.

Ответ: 1,5 м/с; 2,3 Н; 2,5 Н.

1.18. Определить ускорения грузов предыдущей задачи, если в оси блока действует сила трения, создающая тормозящий момент $M_{торм}$= 0,04 Н·м, а радиус блока равен 10 см.

Ответ: 1 м/с^2.

1.19 Легкая нить переброшена через цилиндрический блок радиусом 10 см и массой 0,8 кг с горизонтальной осью вращения. К концам нити прикрепили грузы с массами 0,5 и 0,4 кг. Пренебрегая трением в оси блока, найти скорости вращения блока и движения грузов спустя 1 с после начала движения.

Ответ: 7,5 рад/с; 0,75 м/с.

1.20. Найти ответы на вопросы предыдущей задачи, если в оси блока будет действовать сила трения, создающая тормозящий момент 0,04 Н·м.

Ответ: 7,2 рад/с; 0,72 м/с.

2. Релятивистская механика

Основные понятия, величины, законы

1. Релятивистское сокращение размеров тела в направлении движения

$$\ell = \ell_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}},$$

где ℓ_0 – длина тела в системе отсчета, относительно которой оно покоится (собственная длина, длина покоящегося тела); ℓ – длина тела в системе отсчета, относительно которой оно движется со скоростью V (длина движущегося тела), C – скорость света.

2. Релятивистское сокращение промежутков времени

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}},$$

где $\Delta\tau_0$ – промежуток (интервал) времени между двумя событиями в системе отсчета, в которой тело покоится; $\Delta\tau$ – промежуток времени между теми же событиями, происходящими в системе отсчета, относительно которой тело движется.

3. Релятивистское правило сложения скоростей

$$\mathrm{V} = \frac{V_0 + U}{1 + \frac{V_0 \cdot U}{C^2}},$$

где U – скорость движущейся инерциальной системы отсчета относительно условно неподвижной; V_0 – скорость тела в движущейся системе отсчета; V – скорость того же тела относительно неподвижной системы отсчета.

4. Релятивистская масса

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}},$$

где m_0 – масса покоящегося тела;

m – масса движущегося тела.

5. Релятивистский импульс

$$p = \frac{m_0 \cdot V}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}.$$

6. Полная энергия релятивистской частицы

$$E = mc^2 = E_0 + W,$$

где $E_0 = m_0 c^2$ – энергия покоящейся частицы;

$W = m_0 \cdot C^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}} - 1 \right]$ – кинетическая энергия частицы.

Пример решения задачи

Масса движущейся частицы увеличилась в 1,5 раза (т.е. $m=1{,}5m_0$). Какую скорость V имеет частица? Какая относительная ошибка $\Delta E/E$ будет допущена, если кинетическую энергию частицы в этих условиях рассчитывать классическим образом?

Решение

Масса движущегося тела m и масса покоящегося тела m_0 связаны соотношением: $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$.

Отсюда $\dfrac{m}{m_0} = \dfrac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$ и $1 - \dfrac{V^2}{C^2} = \left(\dfrac{m_0}{m} \right)^2$, тогда $$V = C\sqrt{1-\left(\frac{m_0}{m}\right)^2} = 3\cdot 10^8\sqrt{1-\left(\frac{1}{1{,}5}\right)^2} = 2{,}2\cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

По классической механике кинетическая энергия частицы:

$$E_{кл} = \frac{m_0 \cdot V^2}{2}. \qquad (1)$$

По релятивистской механике:

$$E_{рел} = m_0 \cdot C^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{C^2}}}-1\right). \qquad (2)$$

Тогда

$$\frac{\Delta E}{E_{рел}} = \frac{E_{рел}-E_{кл}}{E_{рел}} = 1-\frac{E_{кл}}{E_{рел}}.$$

Если подставить сюда выражения (1) и (2), то после алгебраических преобразований получим:

$$\frac{\Delta E}{E_{рел}} = 1-\frac{V^2}{2C^2\left[\frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{C^2}}}-1\right]} = 1-\frac{\left(2{,}2\cdot 10^8\right)^2}{2\cdot\left(3\cdot 10^8\right)^2\left[\frac{1}{\sqrt{1-\frac{\left(2{,}2\cdot 10^8\right)^2}{\left(3\cdot 10^8\right)^2}}}-1\right]} = 0{,}43.$$

Задачи для контрольной работы

2.1. Объём воды в океане составляет $V=1{,}37\cdot 10^9$ км^3. На сколько изменится масса воды в океане, если повысить ее температуру на 1^{o}C. Плотность морской воды ρ =1030 кг/м^3.

Ответ: Δ m=$6{,}59\cdot 10^7$ кг.

2.2. Отношение заряда движущегося электрона к его массе, определенное из опыта $q/m=0{,}88\cdot 10^{11}$ Кл/кг. Определите релятивистскую массу электрона и его скорость.

Ответ: $m=2m_0$; v=0,87 c.

2.3. В лабораторной системе отсчета одна из двух одинаковых частиц с массой m_0 покоится, другая движется со скоростью v=0,8 c по направлению к покоящейся частице. Определите релятивистскую массу движущейся частицы в лабораторной системе отсчета и ее кинетическую энергию.

Ответ: $m=1{,}67\ m_0$; $E=0{,}67\ m_0c^2$.

2.4. Электрон движется со скоростью v=0,6 с. Определите его релятивистский импульс и кинетическую энергию Е.

Ответ: $p=2{,}05\cdot10^{-22}$ кг·м/с;
$E=0{,}128$ МэВ.

2.5. Импульс р релятивистской частицы равен m_0c (m_0 – масса покоя). Определите скорость частицы v в долях скорости света и отношение массы движущейся частицы к ее массе покоя m/m_0.

Ответ: v=0,71 с; $m/m_0=1{,}41$.

2.6 Полная энергия α-частицы возросла в процессе ускоренного движения на $\Delta E=56{,}4$ МэВ. На сколько при этом изменится масса частицы? С какой скоростью движется частица? Масса покоя α-частицы $m_0= 4$ а.е.м.

Ответ: $\Delta m=1{,}5m_0$; v=0,917 с.

2.7. Предположим, что мы можем измерить длину стержня с точностью $\Delta\ell = 0{,}1$ мкм. При какой относительной скорости **u** двух инерциальных систем отсчета можно было бы обнаружить релятивистское сокращение длины стержня, собственная длина которого $\ell_0=1$ м? Во сколько раз изменится масса стержня при движении его с рассчитанной скоростью u относительно неподвижной системы отсчета?

Ответ: u = 134 км/с;
$m/m_0 = 1{,}114$.

2.8. Собственное время жизни некоторой нестабильной частицы τ_0 = 10 нс. Найти скорость частицы и путь, который пролетит эта частица до распада, в лабораторной системе отсчета, где время её жизни τ = 20 нс.

Ответ: v = 0,86 с; S = 5,2 м.

2.9. μ-мезон, рождённый в верхних слоях земной атмосферы, движется со скоростью V = 0,99 с относительно Земли и пролетает от места своего рождения до точки распада расстояние l = 3 км. Определить собственное время жизни этого мезона и расстояние, которое он пролетит в этой системе отчёта «с его точки зрения».

Ответ: τ_0 =1,42 мкс; l_0=421,7 м.

2.10. Два стержня одинаковой собственной длины l_0 движутся в продольном направлении навстречу друг другу параллельно общей оси с одной и той же скоростью V = 0,8 с относительно лабораторной системы отсчёта. Во сколько раз длина каждого стержня l в системе отсчёта, связанной с другим стержнем, отличается от собственной длины?

Ответ: l_0/l=4,6.

2.11. На космическом корабле-спутнике находятся часы, синхронизированные до полета с земными. Скорость спутника v=7,9 км/с. На сколько отстанут часы на спутнике по измерениям земного наблюдателя за промежуток времени 0,5 года. Как отличаются значения кинетической энергии спутника, если расчет провести по классической и релятивистской формулам? Масса покоя спутника составляет 10 т.

Ответ: τ = 0,54 с;
E= $3{,}12\cdot10^{10}$ Дж.

2.12. Какая относительная погрешность будет допущена, если расчёт импульса частицы, движущейся со скоростью: 1) 10 км/с, 2) 10^3 км/с, 3) 10^5 км/с, 4) 0,9 с произвести в рамках классической механики?

Ответ: 1) $\frac{p_{рел}}{p_{кл}} = 1$; 2) $\frac{p_{рел}}{p_{кл}} = 1$;
3) $\frac{p_{рел}}{p_{кл}} = 1{,}06$; 4) $\frac{p_{рел}}{p_{кл}} = 2{,}3$.

2.13. Какую работу необходимо совершить, чтобы скорость частиц с массой покоя m_0, изменилась от 0,6 с до 0,8 с? Сравнить полученный результат со значением работы, вычисленным по классической формуле.

Ответ: $A=0{,}417m_0c^2$; $A/A_0=2{,}98$.

2.14. Фотонная ракета движется относительно Земли с такой скоростью, что по часам наблюдателя на Земле ход времени в ней замедляется в 1,25 раз. Какую часть от скорости света составляет скорость движения ракеты? На сколько изменятся линейные размеры ракеты в направлении движения, если первоначально длина ракеты составляла 35 м?

Ответ: v=0,6 с; $\Delta\ell$ =7 м.

2.15. Импульс релятивистского электрона равен $3\cdot10^{-22}$ кг·м/с. Найти кинетическую энергию этого электрона.

Ответ: E=0,76 Мэв.

2.16. Собственное время жизни μ-мезона равно τ_0 = 2 мкс. От точки рождения до точки распада мезон пролетает относительно земли расстояние 6 км. С какой скоростью двигался мезон?

Ответ: v=0,995 с.

2.17. Кинетическая энергия ускоряемого протона возросла до $3\cdot10^{-10}$ Дж. Во сколько раз изменилась при этом масса протона? Какова скорость протона?

Ответ: $m/m_0=3$; $v=2{,}8\cdot10^8$ м/с.

2.18. Две релятивистские частицы движутся в лабораторной системе отсчета со скоростями $v_1=0{,}6$ с и $v_2=0{,}9$ с вдоль одной прямой. Определите их относительную скорость в двух случаях: 1) частицы движутся в противоположных направлениях; 2) частицы движутся в одном направлении. Чему равна кинетическая энергия первой частицы в системе отсчета связанной со второй, если первая частица – протон?

Ответ: 1) v=0,974 c, $E_{1,2}$=5,15 пДж;
2) v=0,195 c, $E_{1,2}$=07 пДж.

2.19. С какой скоростью (в долях от скорости света) должен двигаться электрон, чтобы его масса возросла на $6\cdot10^{-31}$ кг. Какую кинетическую энергию имеет электрон при такой скорости?

Ответ: v = 0,85 c; E = 0,45 Мэв.

2.20. Кинетическая энергия движущегося тела в 2 раза превышает энергию покоя. Во сколько раз уменьшается при этом видимый размер тела в направлении движения? Какова скорость тела?

Ответ: l_0/l=3; v=0,94 c.

3. Квантовая механика

Основные понятия, величины, законы

1. Дебройлевская длина волны движущейся частицы

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mV},$$

где h – постоянная Планка; m – масса частицы; V – скорость частицы; p= mV – импульс частицы.

2. Условие минимума при дифракции на щели

$$a\cdot\sin\alpha = k\cdot\lambda,$$

где a – ширина щели; α – угол дифракции; k – номер (порядок) максимума; λ – длина волны излучения или дебройлевская длина волны частиц, падающих на щель.

Пример решения задачи

Альфа-частица, движущаяся по окружности радиусом R=10 см в однородном магнитном поле, имеет длину волны, равную λ=10 пм. Найти индукцию магнитного поля **B**, в котором движется частица.

Решение

На заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, действует сила Лоренца

$$F_л = qBV,$$

где q – электрический заряд частицы (у альфа-частицы $q=2e=3.2\cdot10^{-19}$Кл, где e-заряд электрона); B – индукция магнитного поля; V – скорость частицы.

Эта сила направлена всегда перпендикулярно вектору скорости и поэтому меняет скорость по направлению, «заставляет» частицу двигаться по окружности, сообщает ей центростремительное ускорение a= $\frac{V^2}{R}$.

По второму закону Ньютона F=m·a. Тогда для частицы q·B·V = m·$\frac{V^2}{R}$, откуда

$$B = \frac{m \cdot V}{q \cdot R}. \qquad (1)$$

Из формулы Дебройля $\lambda = \frac{h}{m \cdot V}$ получим $mV = \frac{h}{\lambda}$ и подставим в (1).

Тогда $B = \frac{h}{\lambda q R} = \frac{6.6 \cdot 10^{-34}}{10 \cdot 10^{-12} \cdot 3.2 \cdot 10^{-19} \cdot 0.1} = 2 \cdot 10^{-3}$ Тл.

Задачи для контрольной работы

3.1. Какую энергию нужно дополнительно сообщить электрону, чтобы его дебройлевская длина волны уменьшилась от 200 до 150 пм?

Ответ: 28,9 эВ.

3.2. Электрон обладает кинетической энергией 30 эВ. Определить дебройлевскую длину волны электрона. Во сколько раз изменится эта длина волны, если кинетическая энергия уменьшится на 20%?

Ответ: $2{,}2 \cdot 10^{-10}$ м, 1,12.

3.3. Вычислить дебройлевские длины волн электрона, протона и атома урана, имеющих одинаковые кинетические энергии 200 эВ.

Ответ: 87 пм; 2 пм; 0,13 пм.

3.4. Найти дебройлевские длины волн для молекул азота и водорода, имеющих наиболее вероятные скорости при нормальных условиях.

Ответ: $3{,}5 \cdot 10^{-11}$ м; $13{,}2 \cdot 10^{-11}$ м.

3.5. Дебройлевская длина волны протона при его ускорении в электрическом поле уменьшилась от 10^{-10} до $3 \cdot 10^{-11}$м. На сколько увеличилась энергия протона?

Ответ: 0,83 эВ.

3.6. Какова дебройлевская длина волны электрона, имеющего кинетическую энергию 1 МэВ?

Ответ: 0,12 пм.

3.7. Вычислить дебройлевские длины волн для электрона и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов 10 В.

Ответ: 390 пм; 9,1пм

3.8. На какую величину и на сколько процентов по отношению к нормальным условиям должна измениться температура идеального газа, чтобы дебройлевская длина волны его молекул уменьшилась на 10% ?

Ответ: 64К; 23%.

3.9. Какую укоряющую разность потенциалов в электрическом поле должна пройти α-частица, чтобы ее дебройлевская длина волны уменьшилась от 180 до 50 пм ?

Ответ: 0,04 В.

3.10. α-частица была ускорена в электрическом поле с разностью потенциалов $\Delta\varphi$. При этом на выходе из поля ее дебройлевская длина волны оказалась равной 2,62 пм. Какую дебройлевскую длину волны будет иметь позитрон, если его ускорить в этом же электрическом поле?

Ответ: 31,6 пм.

3.11. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти релятивистский электрон, чтобы его дебройлевская длина волны оказалась равной 1,8 пм?

Ответ: 350 кВ.

3.12. Найти дебройлевскую длину волны протонов, движущихся со скоростью $0{,}9 \cdot c$ (где c – скорость света). Во сколько раз изменится эта длина волны, если кинетическая энергия протона уменьшится в 1000 раз?

Ответ: $6{,}3 \cdot 10^{-16}$ м; 41.

3.13. Атом водорода, находящийся первоначально в основном состоянии, поглотил фотон с энергией 17 эВ. Какую дебройлевскую длину волны будет иметь выбитый электрон вдали от атома?

Ответ: 66,7 нм.

3.14. Фотон с длиной волны 82 нм ионизирует атом водорода, который находился в невозбужденном состоянии. Какую дебройлевскую длину волны будет иметь образовавшийся свободный электрон?

Ответ: 1 нм.

3.15. Электрон обладает кинетической энергией 1,02 МэВ. Во сколько раз изменится его дебройлевская длина волны, если кинетическая энергия уменьшится вдвое?

Ответ: 1,6 раза.

3.16. Электрон движется по окружности радиусом 1 см в однородном магнитном поле с индукцией 0,05 Тл. Какова дебройлевская длина волны этого электрона?

Ответ: 8,3 пм.

3.17. Пучок параллельно движущихся электронов, имеющих скорости 10^6 м/с, падает нормально на диафрагму с длинной щелью шириной 1 мкм. На экране за щелью на расстоянии 0,5 м образуется дифракционная картина. Определить линейное расстояние между первыми двумя дифракционными минимумами.

Ответ: 0,73 мм.

3.18. Поток одинаково ускоренных электронов падает нормально на щель шириной 0,2 мкм. В дифракционной картине за щелью минимум второго порядка наблюдается под углом 2,9°. Найти по этим данным разность потенциалов ускоряющего электрического поля.

Ответ: 0,06 В.

3.19. Параллельный поток моноэнергетических электронов падает нормально на диафрагму с узкой прямоугольной шириной 1 мкм. Определить скорости этих электронов, если на экране, расположенном от щели на расстоянии 50 см, ширина центрального дифракционного максимума равна 0,36 мм.

Ответ: $2 \cdot 10^6$ м/с.

3.20. Известно, что движущиеся нерелятивистские протон и альфа-частица имеют одинаковые дебройлевские длины волн. Во сколько раз отличаются их кинетические энергии?

Ответ: 4.

4. Законы сохранения

Основные понятия, величины, законы

1. Кинетическая энергия тела в поступательном движении

$$W = \frac{m \cdot V^2}{2},$$

где m – масса тела; V – скорость движения.

2. Потенциальная энергия упруго деформированного тела:

$$W = \frac{k \cdot X^2}{2},$$

где k – коэффициент упругости; X – величина упругой деформации.

3. Потенциальная энергия поднятого над землей тела

$$W = m \cdot g \cdot h,$$

где g – ускорение свободного падения, h – высота тела над поверхностью земли.

4. Импульс тела

$$P = m \cdot V.$$

5. Закон сохранения импульса: суммарный вектор импульса всех тел замкнутой системы остается неизменным. То есть

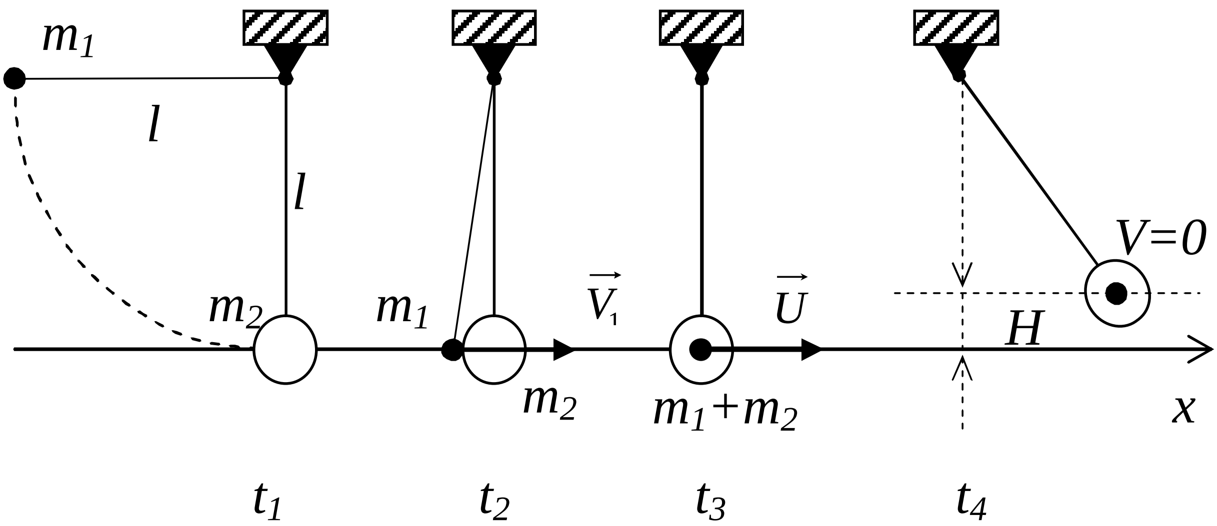
$$\Sigma \vec{P}_i = const\,.$$

6. Закон сохранения механической энергии: полная механическая энергия замкнутой системы тел, между которыми действуют консервативные силы, остается постоянной. То есть

$$\Sigma\left(W_i^{П} + W_i^{К}\right) = const\,.$$

Пример решения задачи

Два небольших шара подвешены на одинаковых нитях длиной L= 0,8 м в одной точке. Массы шаров m_1= 2 кг и m_2= 8 кг. Шар m_1 отвели в сторону так, что его нить приняла горизонтальное положение (на рисунке это момент времени t_1) и отпустили. На сколько увеличится внутренняя энергия ΔE шаров и на какую высоту H они поднимутся после абсолютно неупругого соударения?



Решение

Шар m_1 в момент времени t_1 имеет потенциальную энергию

$$W_{п1} = m_1 \cdot g \cdot L. \qquad (1)$$

При движении его вниз в промежуток времени от t_1 до t_2 потенциальная энергия будет переходить в кинетическую:

$$W_{k1} = \frac{m_1 V_1^2}{2}, \qquad (2)$$

где V_1 – скорость шара m_1 непосредственно перед соударением (то есть в момент времени t_2).

По закону сохранения энергии

$$m_1 gL = \frac{m_1 V_1^2}{2}. \qquad (3)$$

Отсюда скорость шара m_1 непосредственно перед соударением

$$V_1 = \sqrt{2gL} = \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 0{,}8} = 4 \text{ м/с.}$$

Закон сохранения импульса в проекциях на ось X (для моментов времени t_2 и t_3):

$$m_1 V_1 + 0 = (m_1 + m_2) \cdot U, \qquad (4)$$

где U – общая скорость шаров сразу после неупругого удара (они «слиплись») в момент времени t_3.

Отсюда $$U = \frac{m_1 V_1}{m_1 + m_2} = \frac{2 \cdot 4}{2 + 8} = 0{,}8 \text{ м/с.}$$

Таким образом, кинетическая энергия шаров:

– до удара: $W_{k1} = \dfrac{m_1 V_1^2}{2} = \dfrac{2 \cdot 4^2}{2} = 16$ Дж;

– после удара: $W_{k1} = \dfrac{(m_1 + m_2)U^2}{2} = \dfrac{(2 + 8) \cdot 0{,}8^2}{2} = 3{,}2$ Дж. (5)

Изменение кинетической энергии тел в результате неупругого удара, т.е. механическая энергия, перешедшая во внутреннюю энергию ΔE:

$$\Delta E = 16 - 3{,}2 = 12{,}8 \text{ Дж.}$$

После удара в промежутке времени от t_3 до t_4 шары поднимаются, их скорость постепенно уменьшается до нуля, начальная кинетическая энергия (5) переходит в потенциальную $W = (m_1 + m_2) \cdot g \cdot H$. По закону сохранения энергии для моментов времени t_3 и t_4

$$\frac{(m_1 + m_2)U^2}{2} = (m_1 + m_2)gH.$$

Отсюда $$H = \frac{U^2}{2g} = \frac{0{,}8^2}{2 \cdot 10} = 0{,}032 \text{ м} = 3{,}2 \text{ см.}$$

Задачи для контрольной работы

4.1. Шар массой m_1=5 кг движется со скоростью V_1= 1 м/с и сталкивается с покоящимся шаром массой m_2=2 кг. Определите скорости шаров после удара. Удар считать упругим, прямым и центральным.

Ответ: 0,43 м/с; 1,43 м/с.

4.2. Тело массой m_1=5 кг ударяется о неподвижное тело массой m_2=2,5 кг, которое после удара приобретает кинетическую энергию E=5 Дж. Считая удар центральным и упругим, найдите кинетическую энергию первого тела до и после удара.

Ответ: 5,62 Дж; 0,62 Дж.

4.3. Шар массой m_1=4 кг движется со скоростью V_1=5 м/с и сталкивается с шаром массой m_2 =6 кг, который движется ему навстречу со скоростью V_2=2 м/с. Определите скорости шаров после удара. Удар считать абсолютно упругим, прямым и центральным.

Ответ: - 3,4 м/с; 3,6 м/с.

4.4. Движущийся шар массой m_1=2 кг сталкивается с покоящимся шаром большей массы и теряет при этом 40% своей кинетической энергии. Определите массу m_2 большего шара. Удар считать абсолютно упругим, прямым и центральным.

Ответ: 15,7 кг.

4.5. Тело массой m=3 кг движется со скоростью V=4 м/с и ударяется о неподвижное тело такой же массы. Считая удар центральным и абсолютно неупругим, найдите количество тепла, выделившееся при ударе.

Ответ: 12 Дж.

4.6. Из ствола автоматического пистолета вылетела пуля массой m_1=10 г со скоростью V=300 м/с. Затвор пистолета массой m_2 =200 г прижимается к стволу пружиной, жесткость которой к=25 кН/м. Определите, на какое расстояние отойдет затвор после выстрела? Считать, что пистолет жестко закреплен.

Ответ: 4,2 см.

4.7. Два малых по размеру груза массами m_1=10 кг и m_2=15 кг подвешены на нитях одинаковой длины L=2 м в одной точке и соприкасаются между собой. Меньший груз был отклонен на угол $\alpha=60^0$ и отпущен. Определите высоту, на которую поднимутся оба груза после абсолютно неупругого удара.

Ответ: 16 см.

4.8. В деревянный шар массой M=8 кг, подвешенный на нити длиной L=1,8 м, попадает горизонтально летящая пуля массой m=4 г. Определите скорость пули перед ударом, если нить с шаром и застрявшей в нем пулей отклонилась от вертикали на угол $\alpha=3^0$? Размером шара пренебречь, удар пули считать центральным.

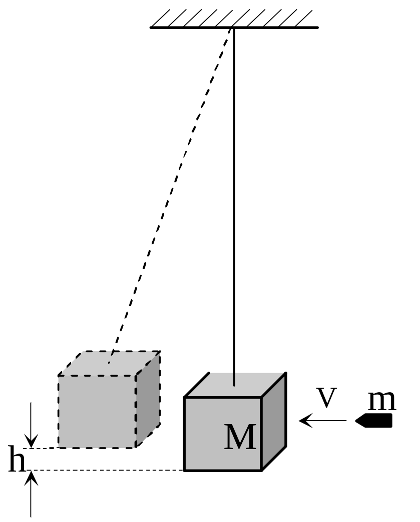
Ответ: 444 м/с.

4.9. Пуля массой m=10 г, летевшая со скоростью V=600 м/с, попала в баллистический маятник массой M=5 кг и застряла в нем (см. рисунок). Определите, на какую высоту, откачнувшись после удара, поднялся маятник?

Ответ: 7,2 см.

4.10. Пуля, летящая горизонтально, попадает в шар, подвешенный на легком тонком металлическом стержне, и застревает в нем. Диаметр шара много меньше длины стержня, масса пули m=5 г, масса шара M=0,5 кг, скорость полета пули V=500 м/с. Определите, при какой предельной длине стержня шар от удара пули поднимется до верхней точки окружности?

Ответ: 61 см.



4.11. В баллистический маятник массой M=3 кг попадает горизонтально летевшая пуля массой m=8 г и застревает в нем (см. рисунок). Найдите скорость полета пули, если маятник, отклонившись после удара, поднялся на высоту h=10 см.

Ответ: 532 м/с.

4.12. При выстреле из орудия снаряд массой 10 кг получает кинетическую энергию 1,8 МДж. Определить кинетическую энергию ствола орудия вследствие отдачи, если масса ствола равна 600 кг.

Ответ: 30 кДж.

4.13. Ядро атома распадается на два осколка массами $1{,}6\cdot10^{-25}$ кг и $2{,}4\cdot10^{-25}$ кг. Определить кинетическую энергию второго осколка, если энергия первого осколка равна 18 нДж.

Ответ: 12 нДж.

4.14. Молекула распадается на два атома. Масса одного из них в три раза больше другого. Пренебрегая начальной кинетической энергией и импульсом молекулы, определить кинетическую энергию каждого атома, если их суммарная кинетическая энергия 0,032 нДж.

Ответ: 24 пДж; 8пДж.

4.15. Два неупругих шара массами 2 и 3 кг движутся навстречу друг другу со скоростями соответственно 8 и 4 м/с. Определить увеличение внутренней энергии шаров в результате их лобового столкновения.

Ответ: 86,4 Дж.

4.16. Два тела движутся навстречу друг другу и соударяются неупруго. Скорость первого тела до удара равна V_1=2 м/с, скорость второго V_2= 4 м/с. Общая скорость тел после удара по направлению совпадает с направлением скорости V_1 и равна 1 м/с. Во сколько раз кинетическая энергия первого тела была больше кинетической энергии второго тела?

Ответ: 1,25.

4.17. Шар массой m_1=2 кг, летящий со скоростью 5 м/с, ударяет неподвижный шар массой m_2=8 кг. Удар прямой, неупругий. Определить скорость шаров после удара и долю кинетической энергии летящего шара, израсходованную на увеличение внутренней энергии этих шаров.

Ответ: 1 м/с, 0,8.

4.18. Шар массой 2 кг налетает на неподвижный шар массой 8 кг. Импульс движущегося шара равен p_1=10 кг·м/с. Удар шаров прямой и упругий. Определить непосредственно после удара импульс и кинетическую энергию второго шара.

Ответ: 16 кг·м/с; 16 Дж.

4.19. Шар массой m_1=200 г, движущийся со скоростью V_1=10 м/с, ударяет неподвижный шар массой m_2= 800 г. Удар прямой и абсолютно упругий. Каковы скорости шаров после удара ?

Ответ: -6 м/с; 4 м/с.

4.20. Шар массой m=1,8 кг сталкивается с покоящимся шаром большой массы M. В результате прямого упругого удара налетающий шар потерял w=0,36 своей кинетической энергии. Определить массу большого шара.

Ответ: 16,2 кг.

5. Молекулярно-кинетическая теория

Основные понятия, величины, законы

1. Моль – количество вещества, в состав которого входит $N_A = 6\cdot10^{23}$ молекул (или атомов). N_A – число Авогадро.

2. Молярная масса (масса одного моля вещества)

$$\mu = m_o \cdot N_A,$$

где m_o – масса одной молекулы.

3. Количество молей вещества

$$\upsilon = \frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A},$$

где m – масса вещества; N – число молекул вещества.

4. Количество молекул

$$N = \upsilon \cdot N_A = \frac{m}{m_0} = \frac{m}{\mu} N_A .$$

5. Средняя квадратическая скорость молекул газа

$$V = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \ ,$$

где k – постоянная Больцмана, R – газовая постоянная ($R=k \cdot N_A$), T – температура.

6. Средняя кинетическая энергия молекулы

$$E = \frac{i}{2} kT \ ,$$

где i – число степеней свободы молекулы.

6. Плотность вещества

$$\rho = m/V = n \cdot m_o,$$

где V – объем тела; n = N/V – концентрация молекул.

7. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

$$p = nkT \text{ , или } p = \frac{1}{3} n m_0 V^2 \text{, или } p = \frac{2}{3} nE \ ,$$

где p – давление идеального газа.

8. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева-Клапейрона):

$$P \cdot V = \nu RT = (m/\mu)RT.$$

10. Связь макропараметров в адиабатическом процессе

$$pV^{\gamma} = const \ , \ TV^{\gamma-1} = const \ , \ Tp^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = const \ ,$$

Здесь $\gamma = \dfrac{i+2}{i}$, где i – число степеней свободы молекулы.

Пример решения задачи

Два моля двухатомного газа имеют исходную концентрацию молекул $n_1=4 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$. Газ сначала изохорно нагревают так, что средняя кинетическая энергия молекул увеличивается с 0,052 до 0,096 эВ. Затем изотермически сжимают так, что объем газа уменьшается в 2 раза. Найти объем газа в конечном состоянии. Представить графики описанных процессов в координатах Р-Т.

Решение

Кинетическая энергия молекул определяется формулой

$$E=\frac{i}{2}kT,$$

где i = 5 – число степеней свободы молекулы двухатомного газа;

k – постоянная Больцмана; T – температура.

Отсюда можно найти температуры газа в первом и втором состояниях:

$$T_1=\frac{2E_1}{ik}=\frac{2\cdot 0{,}052\cdot 1{,}6\cdot 10^{-19}}{5\cdot 1{,}38\cdot 10^{-23}}=241\,K\,,$$

$$T_2=\frac{2E_2}{ik}=\frac{2\cdot 0{,}096\cdot 1{,}6\cdot 10^{-19}}{5\cdot 1{,}38\cdot 10^{-23}}=445\,K\,.$$

По основному уравнению МКТ P=nкT можно вычислить давление газа в первом состоянии: $P_1=n_1кT_1=4\cdot 10^{25}\cdot 1{,}38\cdot 10^{-23}\cdot 241=1{,}33\cdot 10^5$ Па.

Запишем уравнение Менделеева–Клапейрона для первого и второго состояний:

$$p_1V_1=\nu RT_1; \quad (1)$$

$$p_2V_2=\nu RT_2. \quad (2)$$

Поделив уравнения (1) и (2) с учетом того, что $V_1 = V_2$, получим:

$$\frac{P_1}{P_2}=\frac{T_1}{T_2}\,.$$

Отсюда

$$p_2=p_1\frac{T_2}{T_1}=1{,}33\cdot 10^5\frac{445}{241}=2{,}46\cdot 10^5\,Па\,.$$

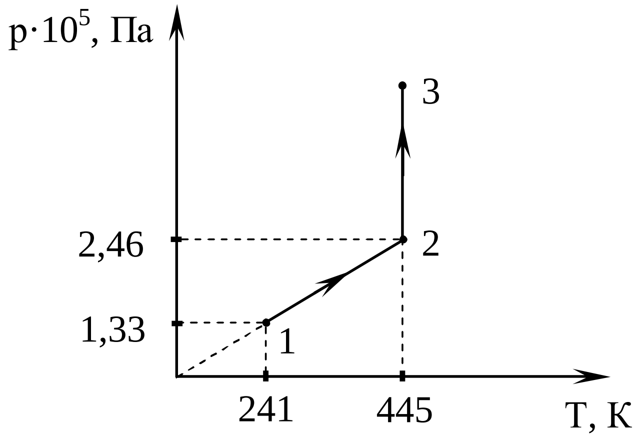
Тогда из уравнения (1)

$$V_2=\frac{\upsilon RT_2}{P_2}=\frac{2\cdot 8.31\cdot 445}{2.46\cdot 10^5}=3\cdot 10^{-2}\,м^3=30\,л.$$

Следовательно, в конечном состоянии

$$V_3=\frac{V_2}{2}=15\,л.$$

Графики процессов представлены на рисунке.



Задачи для контрольной работы

5.1. Идеальный газ изохорически охладили, а затем изобарически расширили до первоначальной температуры. Во сколько раз изменяется энергия поступательного движения молекул газа в изохорическом процессе, если в ходе его давление газа уменьшилось в 3 раза? Во сколько раз изменяется средняя скорость движения молекул в изобарическом процессе?

Ответ: 3; 1,73.

5.2. Идеальный двухатомный газ объемом 5 л и давлением 10^6 Па изохорически нагрели, в результате чего средняя кинетическая энергия его молекул увеличилась от 0,0796 до 0,0923 эВ. Как при этом измениться давление газа? В дальнейшем газ изотермически расширили до начального давления. Определите объем газа в конце процесса.

Ответ: увеличится на 1,16 МПа;
5,8 л.

5.3. 2 моля кислорода изотермически сжали, а затем изобарически расширили до первоначального объема. Известно, что P_1=550 кПа, $V_1=9\cdot10^{-3}$ м^3, а средняя скорость движения молекул в конечном состоянии равна 720 м/с. На сколько изменится конечная средняя кинетическая энергия его молекул относительно начальной. Представить графики описанных процессов в координатах V-T.

Ответ: 0,0072 эВ.

5.4. 3 моля азота плотностью ρ=1,25 кг/м^3 изохорно нагрели так, что его давление изменилось с $1{,}1\cdot10^5$ до $1{,}6\cdot10^5$Па, а затем изобарно сжали до первоначальной температуры. Определите температуры в каждом из трех описанных состояний и конечный объем газа.

Ответ: 297 К; 432 К; 46 л.

5.5. Некоторое количество азота сначала адиабатически сжали, затем изобарически расширили до первоначального объема. Известно, что при изобарическом расширении средняя скорость движения молекул возросла в 1,41 раза. Во сколько раз увеличилось давление при сжатии?

Ответ: 2,64.

5.6. Сосуд объемом 20 л содержит смесь водорода и гелия под давлением 2 атм. Масса смеси 5 г. Средняя энергия поступательного движения молекул 0,038 эВ. Найти отношение массы водорода к массе гелия в этой смеси.

Ответ: 0,45.

5.7. Кислород, находившийся при температуре 370 К, подвергли адиабатическому расширению, в результате которого давление уменьшилось в 4 раза. При последующем изотермическом сжатии установилось первоначальное давление. Найти среднюю скорость движения молекул кислорода в изотермическом процессе.

Ответ: 440 м/с.

5.8. Воздух находится в закрытом пробкой сосуде объемом 3 л при давлении 10^5 Па, равном внешнему атмосферному. Воздух нагрели, в результате чего средняя кинетическая энергия его молекул увеличилась от 0,0647 до 0,0863 эВ. Как при этом изменилось давление газа? Как изменится температура воздуха в сосуде, если пробку открыть, в результате чего он очень быстро расширится? Представить графики описанных процессов в координатах P-T.

Ответ: $1{,}33\cdot10^5$Па; 369 К.

5.9. В сосуде объемом 30 л находится некоторый газ, который имеет температуру, соответствующую средней скорости движения молекул 493 м/с. После того, как часть газа была выпущена наружу, давление в сосуде понизилось на 0,78 атм (без изменения температуры). Найти массу выпущенного газа.

Ответ: 29 г.

5.10. Азот адиабатически расширили от начального состояния с температурой T_1 =400 К до состояния с объемом 7 л, в результате чего давление уменьшилось в 4 раза. Затем газ изотермически сжали до первоначального давления. Найти конечный объем азота. Чему равна средняя скорость движения молекул в начале и конце адиабатического расширения?

Ответ:1,7л, 489 м/с, 597м/с.

5.11. Двухатомный газ адиабатически расширяют так, что давление уменьшается в 5 раз. На сколько при этом изменится средняя кинетическая энергия его молекул? Во сколько раз изменится объем газа при последующим изотермическом сжатии до первоначального давления? Начальная температура газа 420 К.

Ответ: 0,0325 эВ; 5.

5.12. Азот с начальными параметрами P_1=500 кПа, T_1= 250 К и $V_1=0{,}5\cdot10^{-3}$ м^3 подвергли изотермическому расширению. Затем он был изобарно сжат до первоначального объема, в результате чего средняя скорость движения молекул уменьшилась в n=1,3 раз. Найти массу азота и V_2 в промежуточном состоянии.

Ответ: 3,4 г; 0,84 л.

5.13. Некоторое количество гелия сначала адиабатически сжали. Затем изобарически расширили до первоначального объема. Во сколько раз изменилась средняя скорость движения молекул гелия при расширении, если известно, что при сжатии давление увеличилось в 3 раза?

Ответ: 1,39.

5.14. В сосуде находится смесь m_1=7, затем ее изобарически расширили до первоначального объема. Известно, что при изобарическом расширении средняя скорость движения молекул возросла в 1,41 раза. Во сколько раз увеличилось давление при сжатии?

Ответ: 2,64.

5.15. Один моль кислорода изотермически расширяют от $V_1=5\cdot10^{-3}$ до $V_2=8\cdot10^{-3}$ м^3. Затем его изобарически сжали до первоначального объема. Известно, что в начальном состоянии P_1=800 кПа. Найдите изменение средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа. Представить графики описанных процессов в координатах V-T.

Ответ: 0,023 эВ.

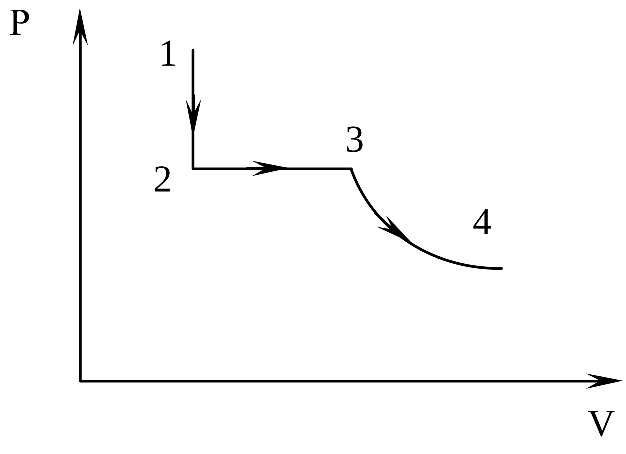
5.16. Двухатомный газ, находившийся в закрытом сосуде при нормальных условиях, нагрели до T=400 К. На сколько изменится средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа? Во сколько раз изменится давление в сосуде, если при открытии пробки газ адиабатически расширится и его температура понизится до 300 К? Представить графики описанных процессов в координатах P-T.

Ответ: 0,0164 эВ; 1,9.

5.17. Некоторое количество двухатомного газа сначала изобарически сжали, затем адиабатически расширили до первоначального объема. Известно, что при расширении давление уменьшилось в 4 раза. Во сколько раз изменилась наиболее вероятная скорость молекул газа при сжатии?

Ответ: 0,61.

5.18. 5 молей кислорода совершают процесс, изображенный на рисунке, состоящий из изохоры, изобары и изотермы. Известно, что в первом состоянии давление $P_1=12\cdot10^5$ Па, объем газа в изобарическом процессе изменяется в 3 раза, объем кислорода в третьем состоянии V_3=24 л, средняя кине-



тическая энергия молекул в конечном состоянии $E_4=2\cdot10^{-20}$ Дж. Найти по этим данным среднюю скорость движения молекул в первом состоянии.

Ответ: 427 м/с.

5.19. С одним молем азота, который имел начальное давление P_1= 120 кПа, провели процесс, состоящий из изохоры и изобары. Известно, что в конце процесса температура стала равной 320 К, а в изохорическом процессе средняя арифметическая скорость молекул газа увеличилась с 430 до 470 м/с. Найдите исходный и конечный объемы газа. Представить графики описанных процессов в координатах V-T.

Ответ: 17 и 19 л.

5.20. В сосуде находится смесь m_1=7 г азота и m_2=11 г углекислого газа при температуре T=290 К и давлении P=1 атм. Найти плотность этой смеси, считая газы идеальными. Во сколько раз отличаются средние скорости движения молекул газов смеси и средние кинетические энергии их движения?

Ответ: 1,5 кг/м^3; 1,25; 1,2.

6. Термодинамика

Основные понятия, величины, законы

1. Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{i}{2}\cdot\frac{m}{\mu}RT = \frac{i}{2}\upsilon RT .$$

2. Работа газа:

- в общем случае $$A = \int_{V_1}^{V_2} P\cdot dV ;$$
- для изобарического процесса $A = p\Delta V = \nu\ R\Delta T$;
- для изохорического процесса $A = 0$;
- для изотермического процесса $A = \nu\ RT\, ln\dfrac{V_2}{V_1}$.

3. Теплоемкость:

- тела (полная) $$C = \frac{dQ}{dT},\ \left[\frac{Дж}{К}\right];$$

- удельная $c = \dfrac{dQ}{m \cdot dT}$, $\left[\dfrac{Дж}{кг \cdot К}\right]$;
- молярная $c_\mu = \dfrac{dQ}{\upsilon \cdot dT}$, $\left[\dfrac{Дж}{моль \cdot К}\right]$.

Молярная теплоемкость при постоянном объеме $c_V = \dfrac{i}{2} R$.

Молярная теплоемкость при постоянном давлении $c_p = \dfrac{i}{2} R + R$.

Здесь Q – количество тепла.

4. Первое начало термодинамики:

- в общем случае $Q = \Delta U + A$;
- для изохорического процесса $Q = \Delta U$;
- для изотермического процесса $Q = A$;
- для изобарического процесса $Q = \Delta U + A$;
- для адиабатического процесса $\Delta U + A = 0$.

Пример решения задачи

Кислород, находящийся при давлении P_1=0,5 МПа и температуре T_1=350 К, подвергли сначала изотермическому расширению от объема V_1=1 л до объема V_2=2 л, а затем изобарному расширению, в результате которого объем увеличился до V_3=3 л. Определить: 1) работу А, совершенную газом; 2) изменение его внутренней энергии ΔU; 3) количество подведенной теплоты Q.

Решение

Запишем уравнение Менделеева–Клапейрона для первого состояния газа: $P_1V_1 = \upsilon RT_1$. Отсюда количество молей кислорода

$$\upsilon = \frac{P_1V_1}{RT_1} = \frac{0{,}5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3}}{8{,}31 \cdot 350} = 0{,}172 \text{ моля}.$$

1. В изотермическом процессе $\Delta U_1 = 0$, $A_1 = \upsilon RT_1 \cdot \ell n \dfrac{V_2}{V_1} =$ $0{,}172 \cdot 8{,}31 \cdot 350 \cdot \ell n \dfrac{2}{1} =$ 345,2 Дж. По первому началу термодинамики: $Q_1 = \Delta U_1 + A_1 = 0 + 345{,}2 = 345{,}2$ Дж.

2. В изобарическом процессе $\Delta U_2 = \frac{i}{2}\upsilon R(T_3 – T_2)$, где i=5 для кислорода (двухатомный газ). Преобразуем последнее выражение с помощью уравнения Менделеева-Клапейрона: $\Delta U_2 = \frac{i}{2}(\upsilon RT_3 - \upsilon RT_2) = = \frac{i}{2}(P_3V_3 - P_2V_2)$. Т.к. $P_3 = P_2$, то $\Delta U_2 = \frac{i}{2} P_2 (V_3 – V_2)$.

Для изотермического процесса $P_1V_1 = P_2V_2$.

Отсюда $p_2 = p_1\frac{V_1}{V_2} = 0{,}5\cdot 10^6 \cdot \frac{1}{2} = 2{,}5\cdot 10^5$ Па.

Тогда $\Delta U_2 = \frac{5}{2} 2{,}5\cdot 10^5(3\cdot 10^{-3} - 2\cdot 10^{-3}) = 625$ Дж.

Работа газа в изобарическом процессе $A_2 = P_2(V_3–V_2) = = 2{,}5\cdot 10^5(3\cdot 10^{-3} - 2\cdot 10^{-3}) = 250$ Дж. И $Q_2 = \Delta U_2 + A_2 = 625 + 250 = 875$ Дж.

Таким образом, окончательно:

$A = A_1 + A_2 = 345{,}2+250 = 595{,}2$ Дж.

$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0+625 = 625$ Дж.

$Q = Q_1+Q_2 = 345{,}2+875 = 1{,}22\cdot 10^3$ Дж.

Задачи для контрольной работы

6.1. 12 г азота находятся в закрытом сосуде объемом 2 л при температуре 10ºС. После нагревания давление в сосуде стало равно 10^4 мм.рт.ст. Какое количество тепла было сообщено газу при нагревании?

Ответ: $4{,}1\cdot 10^3$ Дж.

6.2. В результате изотермического расширения азота массой m=0,2 кг при температуре T=280 К объем его увеличивается в 2 раза. Определить: 1) работу A, совершенную газом при расширении; 2) изменение внутренней энергии ΔU; 3) количество теплоты Q, полученное газом.

Ответ: $1{,}152\cdot 10^4$ Дж; 0 Дж;
$1{,}152\cdot 10^4$ Дж.

6.3. В закрытом сосуде находится 14 г азота при давлении 10^5 Па и температуре 27ºС. После нагревания давление в сосуде увеличилось в 5 раз. Определить: 1) до какой температуры был нагрет газ; 2) каков объем сосуда; 3) какое количество тепла сообщено газу?

Ответ: 1500 К; 12,5 л; 12,5 кДж.

6.4. Объем водорода при изотермическом расширении при температуре T=300 К увеличивается в n=3 раза. Определить работу, совершенную газом, и теплоту, полученную при этом. Масса водорода m равна 200 г.

Ответ: 273,8 кДж; 273,8 кДж.

6.5. В закрытом сосуде объемом 10 л находится воздух при давлении 10^5 Па. Какое количество тепла надо сообщить воздуху, чтобы повысить давление в сосуде в 5 раз?

Ответ: 10^4 Дж.

6.6. При изотермическом расширении водород получил количество теплоты Q=800 Дж. Во сколько раз увеличился его объем, если расширение происходило при температуре T=300 К, а количество вещества ν=0,4 моль.

Ответ: в 2,23 раза.

6.7. Азот находится в закрытом сосуде объемом 3 л при температуре 27°С и давлении 3 атм. После нагревания давление в сосуде повысилось до 25 атм. Определить: 1) температуру азота после нагревания; 2) количество тепла, сообщенного азоту.

Ответ: 2500 К; 16,5 кДж.

6.8. Какая работа совершается при изотермическом расширении водорода массой m=5 г, взятого при температуре T=290 К, если объем газа увеличился в 3 раза.

Ответ: 6619 Дж.

6.9. 10 г кислорода находятся под давлением $3 \cdot 10^5$ Па при температуре 10°С. После нагревания при постоянном давлении газ занял объем 10 л. Найти: 1) количество тепла, полученного газом; 2) энергию теплового движения молекул газа до и после нагревания.

Ответ: $7{,}93 \cdot 10^3$ Дж; $1{,}84 \cdot 10^3$ Дж; $7{,}5 \cdot 10^3$ Дж.

6.10. Какое количество тепла надо сообщить 12 г кислорода, чтобы нагреть его на 50°С при постоянном давлении?

Ответ: 545 Дж.

6.11. 2 л азота находится под давлением 10^5 Па. Какое количество тепла надо сообщить азоту, чтобы: 1) при постоянном давлении его объем увеличился вдвое; 2) при постоянном объеме давление увеличилось вдвое?

Ответ: 700 Дж, 500 Дж.

6.12. На нагревание 40 г кислорода от 16 до 40°С затрачено 628,5 Дж. При каких условиях нагревался газ: при постоянном давлении или при постоянном объеме?

Ответ: при постоянном объеме.

6.13. 2 кмоля углекислого газа нагреваются при постоянном давлении на 50°С. Найти: 1) изменение его внутренней энергии; 2) работу расширения; 3) количество тепла, сообщенного газу.

Ответ: 2493 кДж; 831 кДж;
3324 кДж.

6.14. Двухатомному газу сообщено 2,1 кДж тепла. При этом газ расширяется при постоянном давлении. Найти работу расширения газа.

Ответ: 600 Дж.

6.15. При изобарическом расширении двухатомного газа была совершена работа в 157 Дж. Какое количество тепла было сообщено газу?

Ответ: 549,5 Дж.

6.16. Газ, занимающий объем 5 л, находится под давлением $2 \cdot 10^5$ Па и температуре 17°С. Газ нагревают и он расширяется изобарически. Работа расширения оказалась равной 197 Дж. На сколько нагрели газ?

Ответ: на 57 К.

6.17. Какая доля количества теплоты Q, подводимого к идеальному двухатомному газу при изобарном процессе, расходуется на увеличение внутренней энергии газа ΔU и какая доля – на работу расширения А?

Ответ: 5/7; 2/7.

6.18. 7 г углекислого газа было нагрето на 10°С в условиях свободного расширения. Найти работу расширения газа и изменение его внутренней энергии.

Ответ: 13,2 Дж; 39,6 Дж.

6.19. 1 кмоль многоатомного газа нагревается на 100°С в условиях свободного расширения. Найти: 1) количество теплоты, сообщенного газу; 2) изменение его внутренней энергии; 3) работу расширения.

Ответ: $3{,}32 \cdot 10^6$ Дж; $2{,}49 \cdot 10^6$ Дж; $8{,}31 \cdot 10^5$ Дж.

6.20. В сосуде под поршнем с площадью поперечного сечения 10 см^2 находится 1 г азота при давлении 1 атм. Найти: 1) Какое количество тепла надо затратить, чтобы нагреть азот на 10°С; 2) На сколько при этом поднимается поршень?

Ответ: 10,4 Дж; 3см.

7. Ядерная физика

Основные понятия, величины, законы

1. Обозначение ядра X_Z^A**,**

где X – химический символ атома, в состав которого входит данное ядро;

Z – число протонов в ядре или электрический заряд ядра, выраженный в зарядах электрона;

A – суммарное число протонов и нейтронов в ядре, или барионный заряд ядра, или приближенная масса ядра в а.е.м. (массовое число).

A – Z = N – число нейтронов в ядре.

2. Символы некоторых элементарных частиц:

протон: p_1^1 нейтрон: n_0^1

электрон: e_{-1}^0 позитрон: e_1^0

α-частица: $\alpha_2^4 = He_2^4$ β-частица: β_{-1}^0

γ-квант: γ_0^0

3. Дефект массы ядра

$$\Delta m = \left(Zm_p + Nm_n\right) - M_я ,$$

где $M_я$ – масса ядра.

4. Энергия связи ядра

$$E = \Delta m \cdot c^2 ,$$

где c – скорость света.

Или

$$E = 931{,}5\Delta m ,$$

где Δm – выражается в а.е.м.; Е – в МэВ.

931,5 МэВ/а.е.м. – энергия, приходящаяся на 1 а.е.м.

5. Энергия, выделенная (или поглощенная) в ядерной реакции

$$E = c^2\left[\left(m_1 + m_2\right) - \left(m_3 + m_4\right)\right],$$

где m_1 и m_2 – массы ядер, вступающих в реакцию, m_3 и m_4 – массы ядер, образующихся в результате протекания реакции.

6. Любая ядерная реакция протекает с выполнением законов сохранения электрического и барионного зарядов.

Пример решения задачи

При взрыве водородной бомбы протекает термоядерная реакция синтеза ядер гелия He_2^4 из ядер тяжелого (дейтерия) H_1^2 и сверхтяжелого (трития) H_1^3 водорода: $H_1^2 + H_1^3 \Rightarrow He_2^4$.

Записать эту реакцию, вычислить энергию Е, выделяющуюся в ней, и найти общее выделение энергии W при образовании 1 г гелия.

Решение

Предполагаем, что в реакции образуется еще одна ядерная частица X_Z^A с неизвестными пока электрическим Z и барионным A зарядами. Тогда реакция будет выглядеть следующим образом:

$$H_1^2 + H_1^3 = He_2^4 + X_Z^A .$$

По закону сохранения электрического заряда (нижние цифровые значки): 1 + 1 = 2 + Z. Отсюда Z = 0.

По закону сохранения барионного заряда (верхние цифровые значки): 2 + 3 = 4 + А. Отсюда А = 1.

То есть $X_Z^A = X_0^1 = n_0^1$. Это нейтрон.

Таким образом, ядерная реакция имеет вид

$$H_1^2 + H_1^3 = He_2^4 + n_0^1 .$$

Найдем по прил. 1 (приведена ниже) массы частиц этой реакции: m_1=2,014101 а.е.м., m_2=3,016049 а.е.м., m_3=4,002603 а.е.м., m_4=1,008664 а.е.м. и вычислим выделяющуюся энергию:

$$E = 931{,}5\,[(m_1+m_2) - (m_3+m_4)] = 931{,}5\,[(2{,}014101+3{,}016049) -$$
$$- (4{,}002603+1{,}008664)] = 931{,}5\cdot 0{,}01888 = 17{,}6 \text{ МэВ}.$$

Переведем в джоули: $E = 17{,}6\cdot 10^6\cdot 1{,}6\cdot 10^{-19} = 28{,}14\cdot 10^{-13}$ Дж.

В 1 г гелия $N = \dfrac{1г}{m_3} = \dfrac{10^{-3}кг}{4{,}002603\cdot 1{,}66\cdot 10^{-27}кг} = 1{,}5\cdot 10^{23}$ шт. атомов.

Поэтому $W = N\cdot E = 1{,}5\cdot 10^{23}\cdot 28{,}14\cdot 10^{-13} = 4{,}22\cdot 10^{11}$ Дж.

Примечание: такая же энергия выделяется при сгорании примерно 10 т бензина.

Задачи для контрольной работы

Для приведенных ниже ядерных реакций:

1. Написать недостающие обозначения для частицы X и обосновать их законами сохранения.
2. Вычислить с помощью табличных значений масс ядер и частиц (см. прил. 1) энергию, выделяемую (поглощаемую) в ядерной реакции.

7.1. $Li^7 + p = X + Be^7$. Ответ: -1,64 МэВ.

7.2. $Be^9 + n = X + Be^{10}$. Ответ: 6,82 МэВ.

7.3. $Li^7 + \alpha = X + B^{10}$. Ответ: -2,79 МэВ.

7.4. $O^{16} + X = \alpha + N^{14}$. Ответ: 3,11 МэВ.

7.5. $Li^6 + H^2 = \alpha + X$. Ответ: 22,4 МэВ.

7.6. $B^{10} + n = X + Li^7$. Ответ: 2,79 МэВ.

7.7. $Be^9 + \alpha = X + C^{12}$. Ответ: 5,70 МэВ.

7.8. $Li^7 + X = \alpha + \alpha$. Ответ: 17,4 МэВ.

7.9. $Be^9 + X = n + B^9$. Ответ: -1,84 МэВ.

7.10. $C^{12} + n = Be^9 + X$. Ответ: -5,70 МэВ.

7.11. $C^{13} + H^2 = X + N^{14}$. Ответ: 5,32 МэВ.

7.12. $H^2 + H^3 = X + n$. Ответ: 17,6 МэВ.

7.13. $H^2 + X = He^3 + n$. Ответ: 3,26 МэВ.

7.14. $Be^9 + X = \alpha + Li^6$. Ответ: 2,13 МэВ.

7.15. $C^{14} + \alpha = O^{17} + X$. Ответ: -1,83 МэВ.

7.16. $H^2 + H^2 = H^3 + X$. Ответ: 4,02 МэВ.

7.17. $Li^6 + H^2 = X + Li^7$. Ответ: 5,02 МэВ.

7.18. $Be^9 + H^2 = B^{10} + X$. Ответ: 4,36 МэВ.

7.19. $F^{19} + X = O^{16} + \alpha$. Ответ: 8,12 МэВ.

7.20. $He^3 + H^2 = X + He^4$. Ответ: 18,3 МэВ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 1994. 542 с.
2. Ивлиев А.Д. Физика: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2008. 671 с.
3. Рогачев Н.М. Курс физики: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2008. 447 с.

Приложение 1

Массы частиц и легких атомов

Частица, атом	Масса, а.е.м.	Частица, атом	Масса, а.е.м.
n	1,008664	Be^{10}	10,013533
H^1	1,007925	B^9	9,013328
H^2	2,014101	B^{10}	10,012937
H^3	3,016049	C^{12}	12,000000
He^3	3,016029	C^{13}	13,003354
He^4	4,002603	C^{14}	14,003241
Li^6	6,015122	N^{14}	14,003074
Li^7	7,016004	O^{16}	15,994914
Be^7	7,016929	O^{17}	16,999131
Be^9	9,012182	F^{19}	18,998403

Приложение 2

Физические постоянные

Гравитационная постоянная	$G=6{,}67\cdot10^{-11}$ Н·м²·кг⁻².
Скорость света в вакууме	$c = 3\cdot10^{8}$ м/с.
Электрическая постоянная	$\varepsilon_o = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м.
Магнитная постоянная	$\mu_o = 4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м.
Постоянная Планка	$h = 6{,}625\cdot10^{-34}$ Дж·с.
Постоянная Больцмана	$k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К.
Постоянная Авогадро	$N_A = 6\cdot10^{23}$ 1/моль.
Масса электрона	$m = 9{,}1\cdot10^{-31}$ кг.
Заряд электрона	$e = 1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл.
Масса протона	$1{,}673\cdot10^{-27}$ кг.
Масса нейтрона	$1{,}675\cdot10^{-27}$ кг.
Масса альфа-частицы	$6{,}64\cdot10^{-27}$ кг.
Газовая постоянная	$R = 8{,}31$ Дж/мольК.
Ускорение свободного падения	$g = 9{,}8$ м/с^2 .

Приложение 3

Соотношение между некоторыми единицами измерения

1 а.е.м. = $1{,}66\cdot10^{-27}$ кг.
1 эВ = $1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж.
1 МэВ = 10^{6} эВ.
1 л = 10^{-3} м^3.
1 атм = 10^{5} Па.
1 мм.р.с. = 133,3 Па.

Учебное издание

КОЧКИН Юрий Павлович

ФИЗИКА

Учебное пособие

Редактор Н.П. Боярова
Компьютерная верстка Т.В. Леонтьевой

Подписано в печать 24.09.2015. Рег. № 81-15. Формат 60x84 $^{1}/_{16}$. Бумага тип. № 1.
Плоская печать. Усл.печ.л. 3,50. Тираж 100 экз. Заказ 617.

Издательский центр ФГБОУ ВПО «МГТУ»
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Полиграфический участок ФГБОУ ВПО «МГТУ»