

В. К. Михайлов

ЗАДАЧИ ПО ФИЗИКЕ

- 1. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ**
- 2. ГЕОМЕРИЧЕСКАЯ ОПТИКА**
- 3. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**
- 4. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**
- 5. АТОМНЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ**
- 6. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА**

Учебное пособие

УДК 537.8(075)

Рецензенты:

кафедра лазерной физики ВолГУ,
зав. кафедрой – канд. физ.-мат. наук, доцент В. Н. Храмов;
д-р техн. наук, профессор кафедры информационной безопасности
Института приоритетных технологий ВолГУ А. М. Афанасьев

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета.

Михайлов В. К.

**ЗАДАЧИ ПО ФИЗИКЕ: ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ,
ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА,
ВОЛНОВАЯ ОПТИКА,
КВАНТОВАЯ ФИЗИКА,
АТОМНЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ,
РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА.**

Учеб. пособие. / В. К. Михайлов; ВолГТУ. – Волгоград, 2023.– 104 с.
ISBN 5-9948-1085-9

Содержит около 600 задач разной степени трудности, систематизированных по разделам программы курса «Физика», читаемого студентам технических специальностей Волгоградского государственного технического университета.

Предназначено для подготовки к поступлению в физико-технические вузы, а также для студентов 1-го и 2-го курсов физико-технических специальностей вузов.

Задач 604. Ил. 228. Библиогр.: 0 назв.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Раздел 1. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ	4
1.1. Молекулярно-кинетическая теория	4
1.2. Уравнение состояния идеального газа	7
1.3. Первый закон термодинамики	13
1.4. Фазовые превращения. Уравнение теплового баланса	23
1.5. Пар и его характеристики	27
Раздел 2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА	32
2.1. Законы геометрической оптики	32
2.2. Тонкие линзы	39
2.3. Различные оптические системы	46
2.4. Фотометрия	51
Раздел 3. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА	53
3.1. Монохроматичность света	53
3.2. Интерференция	54
3.2.1. Схема Юнга	54
3.2.2. Тонкие плёнки	56
3.2.3. Кольца Ньютона	57
3.3. Дифракция	58
3.3.1. Дифракция Френеля и дифракция Фраунгофера	58
3.3.2. Дифракционная решётка	59
3.3.3. Угловое разрешение объектива	60
3.3.4. Принцип Гюйгенса-Френеля	61
3.4. Поляризация	61
3.5. Эффект Доплера	62
3.5.1. Эффект Доплера для звуковых волн	62
3.5.2. Эффект Доплера для электромагнитных волн	63
Раздел 4. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	65
4.1. Тепловое излучение	65
4.2. Фотоэлектронная эмиссия	68
4.3. Взаимодействие фотонов с веществом	70
4.4. Релятивистские энергия и импульс	72
4.5. Эффект Комптона	73
Раздел 5. АТОМНЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ	75
5.1. Атомные процессы	75
5.2. Ядерные процессы	77
Раздел 6. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА	81
ОТВЕТЫ	85

Раздел 1. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

1.1. Молекулярно-кинетическая теория

Уравнение состояния идеального газа: $pV = \nu RT$,

где $\nu = m/M = N/N_A$ - число молей, $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – газовая постоянная, $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро.

Эквивалентная форма уравнения состояния идеального газа: $p = nkT$,

где $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Нормальные условия: $p = 1$ атм = 10^5 Па, $T = 273$ К = 0° С.

Закон Дальтона: давление смеси газов $p = p_1 + p_2 + \dots + p_N$.

Кинетическая энергия поступательного движения молекулы: $\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT$.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории: $p = \frac{1}{3}mnv^2$.

1.1. Сколько молекул содержится в 1 г азота?

1.2. Найти массу атома углерода C_6^{12} .

1.3. Сколько молекул в 1 л воздуха при нормальных условиях?

1.4. Сколько атомов в 1 м³ меди, если её плотность $\rho = 8900$ кг/м³?

1.5. Из-за испарения уровень воды в открытом сосуде за сутки понижается на $h = 3$ мм. Сколько молекул каждую секунду уходит в атмосферу с 1 мм² поверхности воды?

1.6*. В середине кабины космической станции в невесомости висит шарик воды радиусом $R = 1$ см. При постоянных температуре и влажности воздуха в кабине с одного квадратного сантиметра поверхности шарика испаряется 10 мг воды в час. Через какое время шарик полностью испарится? Плотность воды $\rho = 1$ г/см³.

1.7. В некое пресноводное озеро площадью 1000 км² и средней глубиной 100 м бросили крупинку ($m = 0,01$ г) поваренной соли $NaCl$. Через много лет, когда её молекулы достаточно равномерно распределились по всему объёму озера, из него взяли чайную ложку воды ($V = 1$ см³). Сколько молекул $NaCl$ окажется в ложке?

Замечание. Поваренная соль, правда, может существовать в молекулярном виде только в парах. Кристаллы $NaCl$ составлены не из молекул, а из ионов Na^+ и Cl^- , образующих кубическую решётку. В воде эта решётка распадается на ионы, которые распределяются между молекулами H_2O .

1.8*. Полусферическая чаша радиусом $R = 5$ см заполнена водой. За первый час из чаши испарилось $\Delta m = 4$ г воды. За сколько часов (N) вода в чаше испарится вся?

1.9. Полагая, что молекулы H_2O в воде расположены достаточно компактно, оценить их характерный размер l .

1.10. Оценить концентрацию n и среднее расстояние d между молекулами газа при нормальных условиях.

1.11*. Одноатомный газ находится при нормальных условиях. Приняв радиус атома $r = 10^{-10}$ м, оценить среднюю длину λ свободного пробега атома, т. е. среднее расстояние между его столкновениями с другими атомами.

1.12. В древних индийских рукописях утверждается, что один раз в миллион лет некий святой муж подходит к алмазной горе и слегка касается ее. В результате прикосновения алмаз стирается. Когда гора сотрётся полностью, наступит конец света. Оценить, через сколько лет это произойдёт. Объём горы V принять равным 1 км^3 , плотность алмаза $\rho = 3,5 \text{ г/см}^3$.

1.13*. Кристалл поваренной соли NaCl имеет кубическую решётку, которая состоит из чередующихся ионов натрия и хлора рис. 1.1. Найти длину ребра элементарного кубика (элементарной ячейки), если плотность соли $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$.

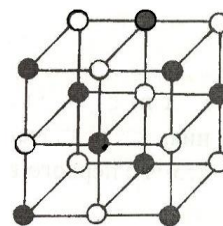


Рис. 1.1.
Кубическая
решётка

1.14*. Многие металлы имеют гранецентрированную кубическую решётку, когда ионы расположены как в вершинах кубической ячейки, так и в центрах её граней. Пусть молярная масса металла равна M , а длина ребра кубической ячейки – a . Найти плотность металла.

1.15*. Железо имеет объёмноцентрированную кубическую решётку, в которой ионы расположены как в вершинах кубической ячейки, так и в центре куба. Вычислить длину ребра a кубической ячейки кристалла железа, если его молярная масса $M = 56 \text{ г/моль}$, а плотность $\rho = 7,87 \text{ кг/дм}^3$.

1.16*. При нагревании железа до 910°C в нём происходит полиморфное превращение: элементарная ячейка его кристаллической решётки из кубической объёмноцентрированной (α -фазы) превращается в кубическую гранецентрированную (γ -фазу) (пояснения терминов в задачах **1.14** и **1.15**). При этом плотность железа уменьшается на $\varepsilon = 2\%$. Найти отношение a_α / a_γ постоянных решёток железа (т. е. длин рёбер ячеек) в α - и γ -фазах.

1.17. В закрытом баллоне происходит полное сгорание кусочка угля с образованием углекислого газа (объём угля мал по сравнению с объёмом баллона). Как изменится давление газа в баллоне после его охлаждения до исходной температуры?

1.18. В закрытом баллоне находится смесь из одного моля кислорода и двух молей водорода. Давление смеси равно p_0 . В результате реакции $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ образовался водяной пар. Найти давление p в баллоне после его охлаждения до исходной температуры, полагая, что конденсации пара в жидкость не происходит.

1.19*. В закрытом баллоне находится смесь кислорода и водорода в равных объёмных долях (по 50%). Давление смеси $p_0 = 100$ кПа. В результате реакции $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ образовался водяной пар. Вычислить давление p в баллоне после его охлаждения до исходной температуры, полагая, что конденсации пара в жидкость не происходит.

1.20. Оценить среднеквадратичную скорость капелек тумана диаметром 10 мкм, находящихся в воздухе при температуре 5 °С.

1.21. Давление газа $p = 100$ кПа, а его плотность $\rho = 1,2$ кг/м³. Найти среднеквадратичную скорость v молекул газа.

1.22. Для увеличения средней скорости молекул идеального газа от $v_1 = 400$ м/с до $v_2 = 500$ м/с его температуру надо повысить на $\Delta T_1 = 90$ К. На сколько надо повысить температуру этого газа, чтобы увеличить скорость его молекул от $v_2 = 500$ м/с до $v_3 = 600$ м/с?

1.23. Плотность алмаза $\rho = 3,5$ г/см³, его молярная масса $M = 12$ г/моль. Определить концентрацию его атомов.

1.24*. Оценить, какая часть атмосферного кислорода Земли расходуется при сжигании 6 млрд. тонн угля, если содержание кислорода в атмосфере около 20%.

Замечание. Такое количество всех видов топлива (уголь, нефть, газ), в пересчёте на уголь, близко к мировой добыче за год, из них более половины приходится на нефть.

1.25*. Самолёт (истребитель) летит на небольшой высоте со скоростью $v_c = 300$ м/с (1080 км/ч). Из-за трения о воздух его корпус нагревается. Оценить максимальную температуру такого нагрева, если температура окружающего воздуха $T_0 = 0$ °С. При какой скорости истребителя $v_{пл}$ его алюминиевый корпус начнёт плавиться, если температура плавления алюминия $T_{пл} = 658^\circ\text{C}$?

1.2. Уравнение состояния идеального газа

1.26. Плотность воздуха при нормальных условиях $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$. Найти его молярную массу M .

1.27. Найти плотность водорода при нормальных условиях.

1.28. Герметичный баллон заполнен водой при температуре $T = 27^\circ\text{C}$. Каким стало бы давление p (атм) в баллоне, если бы силы взаимодействия между молекулами воды исчезли, т. е. она превратилась бы в идеальный газ при той же температуре?

1.29. Какая часть воздуха выйдет из комнаты при повышении температуры в ней от 17 до 27°C ?

1.30. Идеальный газ нагрели от температуры $T_1 = 200 \text{ К}$ до $T_2 = 450 \text{ К}$. Процесс провели так, что давление газа было пропорционально его объёму. Во сколько раз увеличилось давление газа?

1.31. Два баллона объёмами V_1 и V_2 содержат газ при одинаковой температуре T и давлениях p_1 и p_2 . Баллоны соединили трубкой. Какое в них установится давление, если температура не меняется?

1.32. На сколько градусов надо нагреть газ в жёстком баллоне, чтобы его давление возросло вдвое по сравнению с давлением при 0°C ?

1.33. В баллоне объёмом $V = 10 \text{ л}$ находится смесь $m_1 = 16 \text{ г}$ кислорода и $m_2 = 14 \text{ г}$ азота при температуре $T = 300 \text{ К}$. Найти давление смеси газов.

1.34. При нагревании воздуха на 3°C при постоянном давлении его объём увеличился на 1% . Какова исходная температура воздуха?

1.35. Резиновый мяч объёмом $V_0 = 1 \text{ л}$ и массой $m = 200 \text{ г}$ наполнен воздухом при атмосферном давлении $p_0 = 10^5 \text{ Па}$. Мяч погружают в воду и, начиная с некоторой глубины h , он уже не может самостоятельно всплыть. Полагая температуру воздуха в мяче неизменной, вычислить эту глубину.

1.36. В колбе объёмом $V = 1 \text{ л}$ находится газ при температуре $T = 27^\circ\text{C}$. Из-за утечки давление в колбе понизилось на $\Delta p = 3 \text{ кПа}$. Сколько молекул ΔN ушло из колбы, если температура газа в колбе не менялась?

1.37*. Воздух состоит из 20% кислорода и 80% азота (по массе). Найти:
1) среднюю молярную массу воздуха; 2) парциальные давления кислорода и азота при давлении воздуха $p = 1 \text{ атм}$; 3) плотность воздуха при давлении $p = 1 \text{ атм}$ и температуре $T = 273 \text{ К}$.

1.38. Аэростат наполнен гелием. Зависит ли подъёмная сила аэростата от температуры окружающего воздуха? Считать, что температура и давление воздуха и гелия в аэростате одинаковы. Подъёмная сила – это разность архимедовой силы и веса газа-наполнителя.

1.39. Найти подъёмную силу F воздушного шара объёмом $V = 300 \text{ м}^3$, наполненного горячим воздухом при температуре $T = 147^\circ\text{C}$. Шар сообщается с атмосферой. Температура окружающего воздуха $T_0 = 27^\circ\text{C}$, давление $p = 90 \text{ кПа}$.

1.40. Шар объёмом $V = 1 \text{ м}^3$ наполняется горячим воздухом. Общая масса оболочки шара и нагревателя $m_0 = 250 \text{ г}$. До какой температуры T надо нагреть воздух в шаре, чтобы он поднялся, если температура окружающего воздуха $T_0 = 27^\circ\text{C}$, давление $p = 100 \text{ кПа}$?

1.41. Два одинаковых баллона объёмами $V = 1 \text{ л}$ соединены горизонтальной стеклянной трубкой с каналом радиусом $R = 3,4 \text{ мм}$, в котором находится капля ртути (газовый термометр). Баллоны содержат воздух при температуре $T = 0^\circ\text{C}$. На сколько сместится капля, если: а) воздух в одном из баллонов нагреть на $\Delta T = 1^\circ\text{C}$, а в другом охладить на $\Delta T = 1^\circ\text{C}$; б) нагреть на $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ воздух только в одном из баллонов?

1.42. Горизонтальная трубка разделена на две части лёгким скользящим поршнем. В левой части находится $m_1 = 4 \text{ г}$ водорода, а в правой – $m_2 = 14 \text{ г}$ азота. Какую часть трубки занимает азот?

1.43. Горизонтальная трубка длиной l разделена на две равные части лёгким скользящим поршнем. При застопоренном поршне левая часть трубки заполнена газом с давлением p_1 , а правая – с давлением p_2 . На какое расстояние x сместится поршень, если снять стопор?

1.44. В цилиндрической трубке, закрытой с одной стороны и сообщаемой с атмосферой с другой, под лёгким поршнем находится газ при температуре $T = 7^\circ\text{C}$. Длина части трубки с газом $l = 14 \text{ см}$. Найти смещение Δl поршня при нагревании газа на $\Delta T = 20^\circ\text{C}$.

1.45. Цилиндр высотой $h = 50 \text{ см}$ разделён на две части тяжёлым скользящим поршнем массой $m = 10 \text{ кг}$. В частях цилиндра по одинаковому числу молей идеального газа при температуре $T = 300 \text{ К}$. Когда цилиндр поставили вертикально, поршень сместился вниз, так что высота верхней части цилиндра (h_1) стала равной 30 см , а нижней (h_2) – 20 см . Сколько молей газа в каждой части цилиндра? Толщиной поршня пренебречь.

1.46. Внутри запаянной с одного конца трубки находится столбик ртути длиной $h = 15$ см. Длина закрытого столба воздуха в трубке $l_0 = 36$ см (рис. 1.2). Атмосферное давление $p_0 = 75$ см рт. ст. Трубку ставят вертикально открытым концом: **вариант 1** –вверх; **вариант 2** – вниз. Найти соответствующие смещения Δx_1 и Δx_2 столбика ртути в трубке.

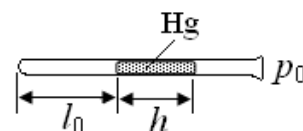


Рис. 1.2

1.47*. Посередине горизонтальной, запаянной с обоих концов трубки, находится столбик ртути длиной $h = 7,6$ см. Длина каждого воздушного столба $l = 20$ см. Если трубку поставить вертикально, ртутный столбик опускается на $\Delta x = 1$ см. Какое давление p_0 (в см рт. ст.) было в трубке?

1.48*. Запаянную с одного конца трубку длиной $l = 57$ см вертикально погружают открытым концом в ртуть на всю её длину l . Найти высоту h столбика ртути, вошедшей в трубку. Давление атмосферы $p_0 = 76$ см рт. ст.

1.49*. Открытую с двух концов трубку длиной $l = 30$ см вертикально погружают в ртуть наполовину. Затем её закрывают сверху и вынимают. Какой длины h столбик ртути останется в трубке? Атмосферное давление $h_0 = 75$ см рт. ст.

1.50*. Открытую с двух концов трубку длиной $l = 30$ см вертикально погружают в ртуть. Затем её закрывают сверху и вынимают. На какую глубину h должен быть опущен нижний конец в ртуть, чтобы после вынимания в трубке остался столбик ртути длиной $l/2$? Атмосферное давление $h_0 = 75$ см рт. ст.

1.51*. В левом, запаянном колене U-образной трубки находится столб воздуха высотой $h_1 = 30$ см (рис. 1.3). Ртуть в обоих коленах находится на одном уровне. Какой будет высота h_2 столба воздуха в левом колене, если правое заполнить ртутью доверху? Атмосферное давление $p_0 = 76$ см рт. ст.

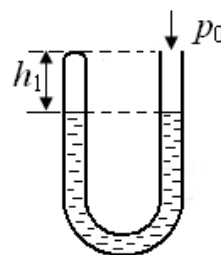


Рис. 1.3

1.52. В тонкой вертикальной трубке длиной $3h = 90$ см с открытым верхним концом находится столбик ртути высотой $h = 30$ см, удерживаемый снизу столбиком воздуха такой же высоты $h = 30$ см (рис. 1.4). Трубку заливают ртутью доверху. Найти высоту h_x столба воздуха под ртутью. Атмосферное давление $h_0 = 76$ см рт. ст.

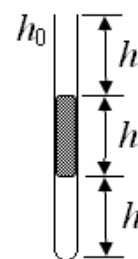


Рис. 1.4

1.53*. В вертикальной цилиндрической трубке, закрытой внизу и сообщающейся с атмосферой сверху, под тяжёлым поршнем массой $m = 2$ кг находится газ при $T = 7$ °С. Длина части трубки с газом $l = 14$ см. Найти смещение Δl поршня при нагревании газа на $\Delta T = 20$ °С.

1.54. С идеальным газом провели циклический процесс, показанный на рис. 1.5. Построить графики этого процесса в координатах (p, T) и (p, V) .

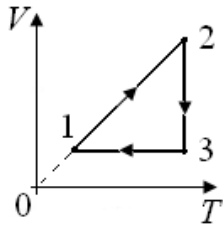


Рис. 1.5

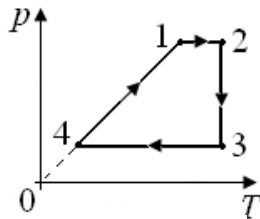


Рис. 1.6

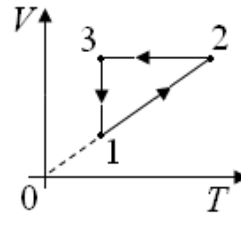


Рис. 1.7

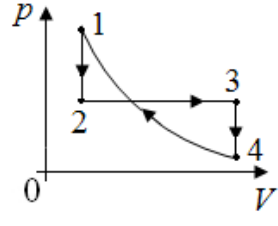


Рис. 1.8

1.55. С идеальным газом провели циклический процесс, показанный на рис. 1.6. Построить графики этого процесса в координатах (p, V) и (V, T) .

1.56. С идеальным газом провели циклический процесс, показанный на рис. 1.7. Построить график этого процесса в координатах (p, p) .

1.57. С идеальным газом проводят циклический процесс, показанный на рис. 1.8. Участок 4-1 – изотерма. Построить графики этого процесса в координатах (V, T) и (p, T) .

1.58. С идеальным газом провели циклический процесс, показанный на рис. 1.9, где ρ – плотность газа. Построить график этого процесса в координатах (T, ρ) .

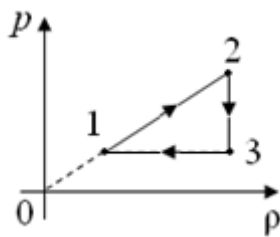


Рис. 1.9

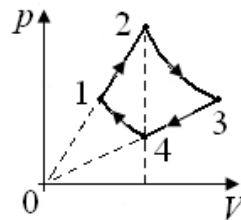


Рис. 1.10

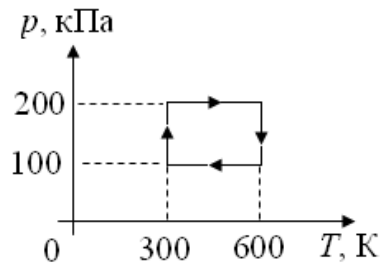


Рис. 1.11

1.59*. С идеальным газом провели циклический процесс, показанный на рис. 1.10, причём $V_2 = V_4$. Участки 2-3 и 4-1 – изотермы. Построить график этого процесса в координатах (V, T) и найти объём V_2 , если $V_1 = 1$ л, $V_3 = 4$ л.

1.60. С двумя молями идеального газа проводят циклический процесс, показанный на рис. 1.11. Найти максимальный и минимальный объёмы газа в этом процессе. Объёмы выразить в литрах.

1.61*. Некий идеальный газ объёмом V_1 , взятый при давлении p_1 , сначала адиабатно сжали до объёма $V_2 = V_1/2$, а затем изохорно охладдили до исходной температуры $T_3 = T_1$, при которой его давление упало в 1,32 раза, т. е. $p_3 = p_2/1,32$. Определить показатель адиабаты γ этого газа.

1.62*. Объём $V_1 = 2$ л воздуха, взятого при давлении $p_1 = 1$ атм сначала адиабатно сжали до некоторого объёма V_2 и давления p_2 . Воздух при этом нагрелся. Затем воздух изохорно охладили до исходной температуры $T_3 = T_1$, при которой его давление p_3 стало равным $2p_1$. Найти давление воздуха p_2 и его объём V_2 после его адиабатного сжатия.

1.63. Поршневой насос качает воздух в баллон объёмом V , захватывая из атмосферы за каждый цикл объём воздуха ΔV . Начальное давление в баллоне – атмосферное p_0 . Считая процесс изотермическим, найти давление p_N в баллоне после N циклов качаний.

1.64*. Поршневой насос откачивает воздух из баллона объёмом V . Объём рабочей камеры насоса – ΔV . Начальное давление в баллоне – атмосферное p_0 . Считая процесс изотермическим, найти давление p_N в баллоне после N циклов качаний.

1.65*. Горизонтальная закрытая с торцов цилиндрическая трубка наполнена газом под давлением p . Длина трубки $2l$, сечение S . Посередине трубки находится поршень массой m , который может двигаться по ней без трения. Пренебрегая толщиной поршня, найти частоту ω его малых колебаний в трубке. Процессы в трубке считать изотермическими.

1.66*. Два смежных теплоизолированных сосуда объёмами $V_1 = 5,0$ л и $V_2 = 3,31$ л содержат одинаковый газ, который можно считать идеальным: в первом $\nu_1 = 0,1$ моль при температуре $T_1 = 300$ К, а во втором $\nu_2 = 0,3$ моль при температуре $T_2 = 400$ К. Между сосудами убирают перегородку и, спустя некоторое время, температуры и давления в них выравниваются. Определить установившееся в них давление p .

1.67. В вертикальном цилиндре с гладкими стенками под тяжёлым поршнем, лежащем на упорах, находится идеальный газ (рис. 1.12, а). Газ занимает объём V_0 , имеет температуру T_0 и атмосферное давление p_0 .

После медленного нагрева газ, поднимая поршень, расширяется до объёма $2V_0$, а его давление становится $2p_0$ (рис. 1.12, б). Построить график зависимости объёма газа от температуры $V(T)$.

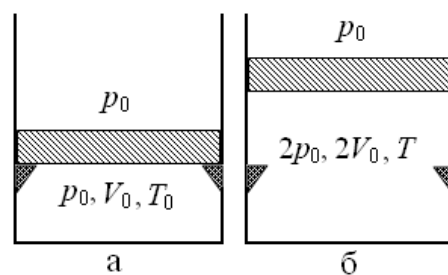


Рис. 1.12

1.68*. Для измерения массы воды в капельках тумана пробу воздуха при давлении $p_0 = 10^5$ Па и температуре $T_0 = 0$ °С герметически закрывают в прозрачном баллоне и нагревают до температуры, при которой туман исчезает. При этом измеряют давление паро-воздушной смеси. Оценить массу воды m_0 в 1 м³ тумана, если температура его исчезновения в баллоне $T = 82$ °С, а давление при этом $p = 180$ кПа.

1.69. Идеальный газ перевели из состояния 1 в 2 (рис. 1.13). Как изменилось его давление?

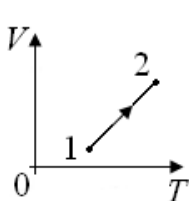


Рис. 1.13

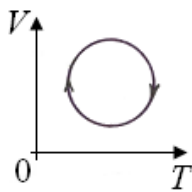


Рис. 1.14

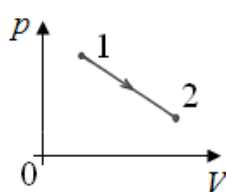


Рис. 1.15

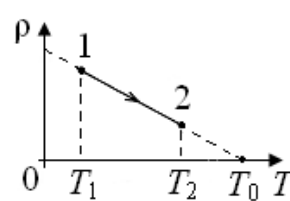


Рис. 1.16

1.70. С идеальным газом провели циклический процесс (рис. 1.14). В каких точках давление газа было максимальным и минимальным?

1.71*. Над идеальным газом проводится процесс 1-2, изображаемый в координатах (p, V) прямой линией на рис. 1.15. Определить наибольшую температуру T_m газа в этом процессе, если $T_2 = T_1 = 300$ К, $V_2 = nV_1$ ($n = 3$).

1.72*. С идеальным газом провели процесс 1-2, изображаемый в координатах (ρ, T) прямой линией (рис. 1.16), где ρ – плотность газа, $T_0 = 800$ К. В точках 1 и 2 давление газа на 25% меньше максимального в этом процессе. Определить температуру T_m , при которой давление газа максимально, а также температуры T_1 и T_2 . Изобразить процесс 1-2 в координатах (p, T) .

1.73*. Нагревается или охлаждается идеальный газ, расширяющийся по закону $pV^n = \text{const}$, где n – любое действительное число?

1.74. В жёстком баллоне находится идеальный двухатомный газ при температуре $T_1 = 300$ К. При нагревании до температуры $T_2 = 6000$ К практически все его молекулы распадаются на атомы. Во сколько раз возросло давление газа?

1.75*. В баллоне объёмом $V = 1$ л находится азот массой $m = 0,28$ г. Азот нагрели до температуры $T = 1500$ °С, при которой 30% всех его молекул диссоциированы на атомы. Найти давление p в баллоне.

1.76*. В баллон объёмом $V = 250$ см³ вводится $m = 0,9$ г жидкой четырёхокси азота N_2O_4 . При нагревании до $T = 0$ °С четырёхокись азота испаряется, и часть её молекул при этом диссоциирует: $\text{N}_2\text{O}_4 \rightarrow 2\text{NO}_2$. Найти долю диссоциированных молекул, если давление p в баллоне устанавливается равным 1 атм.

1.77. Сосуд объёмом $V = 10$ л содержит смесь водорода и гелия общей массой $m = 2$ г при температуре $T = 27$ °С и давлении $p = 200$ кПа. Найти массы водорода (m_1) и гелия (m_2) в сосуде.

1.78*. В узкой вертикальной трубке длиной 152 см с закрытым нижним концом находится газ с температурой T_0 , который сверху поджат столбиком ртути высотой $h = 76$ см, так что и высота столбика газа также равна 76 см. Верхний конец трубки открыт в атмосферу, давление которой $p_0 = 76$ см рт. ст (рис. 1.17). До какой наименьшей температуры T надо подогреть газ в трубке, чтобы он вытеснил из неё всю ртуть?

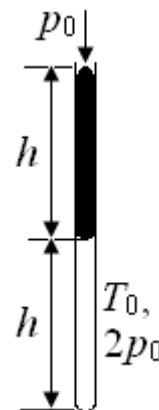


Рис. 1.17

1.3. Первый закон термодинамики

Внутренняя энергия идеального газа: $U = (i/2)\nu RT$, ($i = 3, 5, 6$).

Первый закон термодинамики: $Q = \Delta U + A$.

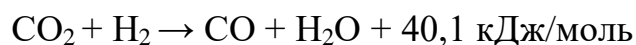
1.79. Найти внутреннюю энергию двухатомного газа в баллоне объёмом $V = 2$ л под давлением $p = 150$ кПа.

1.80. Воздух в комнате нагрели от температуры T_1 до T_2 . Как изменилась внутренняя энергия воздуха в комнате?

1.81. При адиабатном расширении один моль одноатомного идеального газа совершил работу $A = 1250$ Дж. Определить изменение температуры газа.

1.82. Равные массы гелия He и водорода H_2 находятся в теплоизолированном цилиндре под поршнем. Объём цилиндра $V_0 = 1$ л, давление в нём $p_0 = 9$ атм, исходная температура $T_0 = 500$ К. При адиабатном расширении смесь газов совершила работу $A = 660$ Дж. Определить конечную температуру T смеси.

1.83*. В теплоизолированном сосуде с жёсткими стенками находится смесь газов из $\nu_1 = 1$ моля CO_2 и $\nu_2 = 1$ моля H_2 при температуре $T_0 = 880$ К. Во сколько раз возрастёт давление в сосуде в результате реакции



при условии, что конденсации пара в жидкость нет?

1.84. Два литра одноатомного газа находится под давлением 1 атм. Сколько тепла надо передать газу, чтобы при постоянном объёме увеличить его давление вдвое?

1.85. Два литра одноатомного газа находится под давлением 1 атм. Сколько тепла надо передать газу, чтобы при постоянном давлении увеличить его объём вдвое?

1.86. В жёстком баллоне находится 1 моль одноатомного газа при температуре $T = 273$ К. После нагревания давление в баллоне возросло в 3 раза. Сколько тепла передано газу?

1.87. При изобарном нагревании 4 г гелия, взятого при температуре $T = 27^\circ \text{C}$, его объём увеличился в 3 раза. Сколько тепла передано гелию?

1.88. Водяной пар получил $Q = 4$ кДж тепла и расширился при постоянном давлении. Определить работу расширения.

1.89. Какая доля тепла, сообщенного одноатомному идеальному газу в изобарном процессе, идёт на увеличение его внутренней энергии, а какая на совершение работы?

1.90. Объём газа увеличился вдвое. При каком процессе газ совершит бóльшую работу: при изобарном или при изотермическом?

1.91. Идеальный одноатомный газ совершает одинаковую работу в изобарном и в изотермическом процессах. Найти отношение $\eta = Q_p/Q_T$ теплот, полученных газом в этих процессах.

1.92*. Для нагревания $m = 2$ кг некоторого идеального газа на $\Delta T = 5$ К при постоянном давлении затрачено $Q_p = 9,1$ кДж тепла, а для нагревания при постоянном объёме – $Q_v = 6,5$ кДж. Найти молярную массу газа.

1.93. В жёстком баллоне объёмом $V = 2$ л находится одноатомный идеальный газ при нормальных условиях. С помощью электрической спирали, установленной в баллоне, газу сообщено $Q = 300$ Дж тепла. Найти конечные температуру и давление газа.

1.94. 28 г азота находятся в сосуде под давлением $p = 300$ кПа и температуре $T_1 = 300$ К. После изобарного нагрева газ занял объём $V_2 = 10$ л. Найти тепло Q , полученное азотом, изменение его внутренней энергии ΔU и совершённую им работу A .

1.95. Какой станет температура воздуха, если его адиабатно сжать в два раза? Исходная температура $T_1 = 300$ К.

1.96. При нормальных условиях плотность некоторого двухатомного газа $\rho = 1,43$ кг/м³. Найти удельные теплоёмкости c_v и c_p этого газа.

1.97*. Одноатомный газ из исходного состояния: $V_1 = 2$ л, $p_1 = 10^5$ Па и $T_1 = 300$ К, нагрели до температуры $T_2 = 320$ К, уменьшив объём до $V_2 = 1$ л. Процесс провели так, что на диаграмме (p, V) он изображается прямой линией. Определить работу газа и изменение его внутренней энергии.

1.98*. Моль гелия изобарно сжимают в два раза. Затем его изохорно нагревают, сообщая ему теплоту $Q = 3$ Дж. Затем снова изобарно сжимают до исходной температуры. Какую работу совершили над газом в течение всего процесса?

1.99. С идеальным газом провели циклический процесс, показанный на рис. 1.18. На каких участках газ получает тепло, а на каких отдаёт?

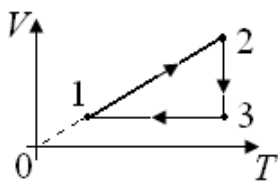


Рис. 1.18

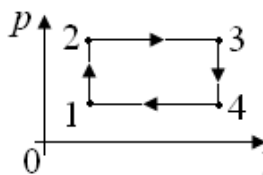


Рис. 1.19

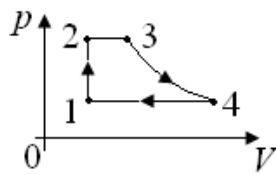


Рис. 1.20

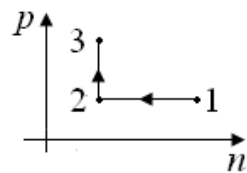


Рис. 1.21

1.100. С идеальным газом провели циклический процесс, показанный на рис. 1.19. На каких участках газ получает тепло, а на каких отдаёт? Какова разница полученного и отданного тепла за цикл?

1.101. С идеальным газом провели циклический процесс, показанный на рис. 1.20. Участок 3-4 – изотерма. На каких участках газ получает тепло, а на каких отдаёт?

1.102. Над идеальным газом совершают двухстадийный процесс, который в координатах (p, n) имеет вид, показанный на рис. 1.21 (здесь p – давление газа, n – концентрация его молекул). Получает или отдаёт тепло газ на участках 1-2 и 2-3 ?

1.103*. С неким газом (не обязательно идеальным) провели два процесса: 0-1 и 0-2, показанных на рис. 1.22, причём конечные точки 1 и 2 лежат на одной адиабате. В каком процессе к газу подвели больше тепла?

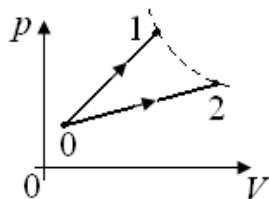


Рис. 1.22

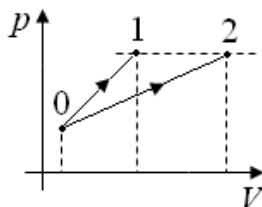


Рис. 1.23

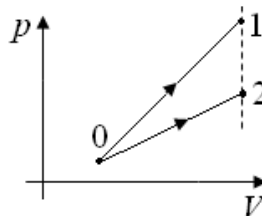


Рис. 1.24

1.104*. С идеальным газом провели два процесса 0-1 и 0-2, показанных на рис. 1.22, причём 0-1 и 0-2 – прямые линии, а точки 1 и 2 лежат на одной изотерме. В каком процессе к газу подвели больше тепла?

1.105. С моём идеального газа провели два процесса: 0-1 и 0-2, показанных на рис. 1.23, где точки 1 и 2 лежат на одной изобаре. В каком процессе к газу подвели больше тепла?

1.106. С моём идеального газа провели два процесса: 0-1 и 0-2, показанных на рис. 1.24, где точки 1 и 2 лежат на одной изохоре. В каком процессе к газу подвели больше тепла?

1.107*. С идеальным газом поочерёдно проводят два процесса 1 и 2, показанных на рис. 1.25. Какое соотношение верно: 1) $Q_1 = Q_2$, 2) $\Delta U_1 < \Delta U_2$, 3) $A_1 < A_2$, 4) $Q_1 > Q_2$? Здесь Q – тепло, полученное газом, A – работа газа.

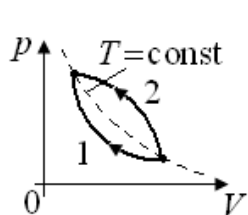


Рис. 1.25

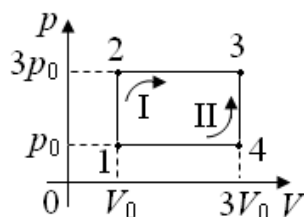


Рис. 1.26

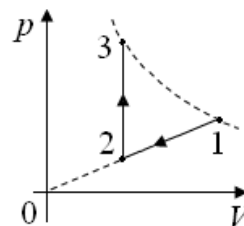


Рис. 1.27

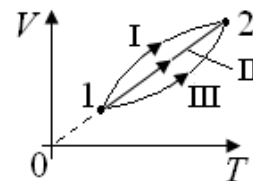


Рис. 1.28

1.108. Идеальный одноатомный газ переводят из состояния 1 в 3 поочерёдно двумя путями: 1-2-3 (путь I) и 1-4-3 (путь II) (рис. 1.26). Найти разность и отношение теплот, полученных газом в этих двух процессах.

1.109. Над молекул гелия совершается двухстадийный процесс 1-2-3, показанный на рис. 1.27, причём $T_3 = T_1$. Найти отношение $Q_{\text{х}}/Q_{\text{н}}$, где $Q_{\text{х}}$ – теплота, отданная газом холодильнику, $Q_{\text{н}}$ – теплота, полученная газом от нагревателя.

1.110*. С идеальным газом можно провести три процесса, показанных на рис. 1.28. Какой процесс требует подведения к газу наибольшего тепла?

1.111. Найти КПД цикла, показанного на рис. 1.29, если рабочим телом является одноатомный идеальный газ.

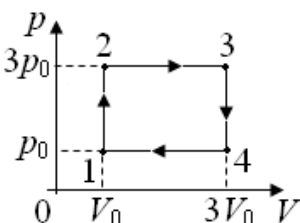


Рис. 1.29

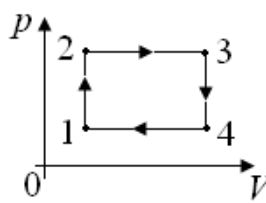


Рис. 1.30

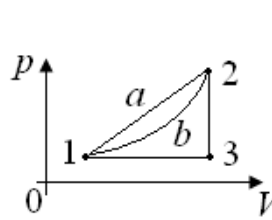


Рис. 1.31

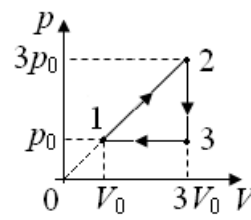


Рис. 1.32

1.112*. С молекул гелия проводят циклический процесс, состоящий из двух изохор и двух изобар с отношением давлений $p_2/p_1 = 3$ (рис. 1.30). При каком отношении объёмов $n = V_2/V_1$ КПД цикла максимален?

1.113*. С молекул идеального газа ведётся циклический процесс из двух изобар и двух изохор (рис. 1.30). Известны температуры T_1 и T_3 , а также то, что точки 2 и 4 лежат на одной изотерме. Найти работу газа за цикл.

1.114*. КПД цикла 1-a-2-3-1 $\eta_1 = 19\%$ (рис. 1.31), а КПД цикла 1-b-2-3-1 $\eta_2 = 10\%$. Найти КПД η_3 цикла 1-a-2-b-1.

1.115. Определить КПД цикла, показанного на рис. 1.32, если рабочим телом является одноатомный идеальный газ.

1.116*. Определить КПД цикла, показанного на рис. 1.33, где участки 2-3 и 4-1 – адиабаты. Известны температуры T_2 и T_3 .

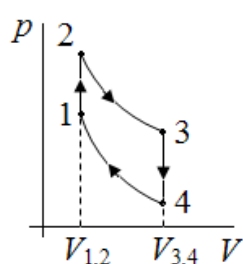


Рис.1.33

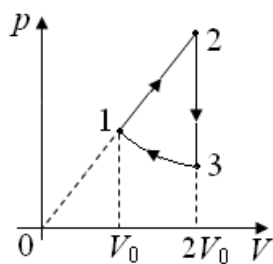


Рис. 1.34

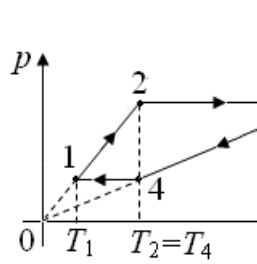


Рис. 1.35

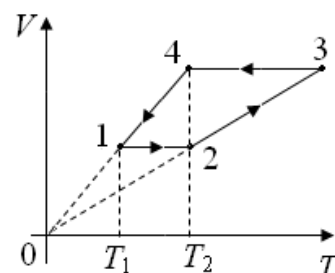


Рис. 1.36

1.117*. Над одноатомным газом проводится циклический процесс, показанный на рис. 1.34. Участок 3-1 – адиабата. На участке 1-2 газ совершает работу $A_{12} = 500$ Дж, а на участке 3-1 работа над газом $A'_{31} = 200$ Дж. Найти КПД цикла η и теплоту Q_x , отдаваемую газом холодильнику.

1.118*. На рис. 1.35, показан циклический процесс, проводимый с одноатомным идеальным газом. Известно, что $T_1 = 300$ К, $T_3 = 4T_1$. Найти температуру T_2 и КПД цикла.

1.119*. На рис. 1.36, показан циклический процесс, проводимый с одноатомным идеальным газом. Известно, что $T_4 = T_2 = 2T_1$. Найти КПД цикла.

1.120. Над молекулой гелия проводят циклический процесс, показанный на рис. 1.37. КПД цикла $\eta = 0,2$, температура $T_0 = 300$ К. Найти работу газа за цикл $A_{\text{ц}}$ и тепло Q_x , отведённое от газа за цикл.

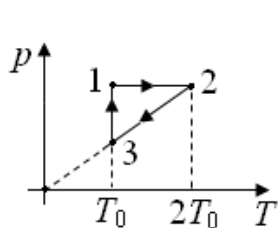


Рис. 1.37

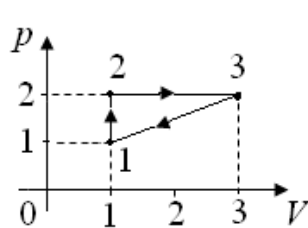


Рис. 1.38

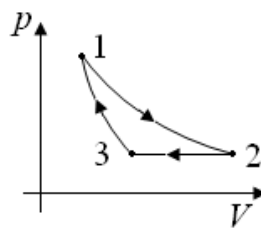


Рис. 1.39

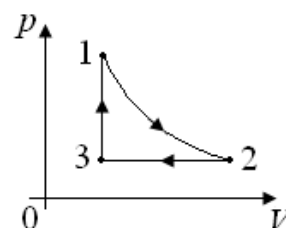


Рис. 1.40

1.121. Над молекулой гелия проводят циклический процесс, показанный на рис. 1.38. За цикл гелий получает от нагревателя теплоту $Q_H = 26$ кДж. Найти: 1) КПД цикла; 2) исходную температуру газа в точке 1.

1.122*. С молекулой гелия проводится циклический процесс, показанный на рис. 1.39, на котором 1-2 – изотерма, 3-1 – адиабата. Работа газа на изотерме $A_{12} = 1500$ Дж, а максимальное изменение температуры за цикл $\Delta T = 60$ К. Найти работу газа за цикл $A_{\text{ц}}$ и КПД цикла.

1.123*. Над гелием проводится циклический процесс, показанный на рис. 1.40, где участок 1-2 – адиабата, на которой $T^3V^2 = \text{const}$, а объём на изобаре 2-3 уменьшается в 8 раз. Найти КПД этого цикла.

1.124*. Найти КПД цикла, показанного на рис. 1.41, если рабочим телом является одноатомный идеальный газ. Известно, что $p_2/p_1 = n = 2$, $V_3/V_1 = m = 3$, участок 2-3 – адиабата.

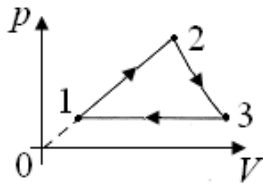


Рис. 1.41

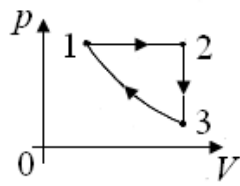


Рис. 1.42

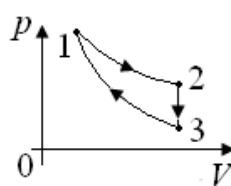


Рис. 1.43

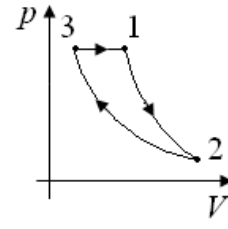


Рис. 1.44

1.125*. С гелием проводится процесс, показанный на рис. 1.42, на котором участок 3-1 – адиабата. Показать, что КПД такого цикла менее 40%.

1.126*. Над молекулами гелия проводится циклический процесс, показанный на рис. 1.43, на котором участок 1-2 – изотерма, а 3-1 – адиабата. Работа газа на изотерме $A_{12} = 1000$ Дж, а максимальное изменение температуры за цикл $\Delta T = 60$ К. Найти работу газа за цикл $A_{\text{ц}}$ и КПД цикла.

1.127*. Над молекулами гелия проводится циклический процесс, показанный на рис. 1.44, где участок 1-2 – адиабата, 2-3 – изотерма. Найти работу газа A_{23} на изотерме 2-3 и КПД цикла, если работа газа за цикл $A_{\text{ц}} = 250$ Дж, а разность температур на изобаре $\Delta T_{31} = 60$ К.

1.128*. С молекулами идеального одноатомного газа проводится циклический процесс, показанный на рис. 1.45. Определить КПД цикла.

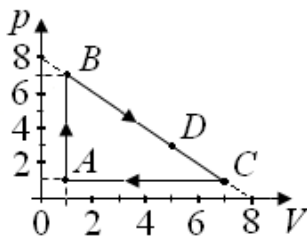


Рис. 1.45

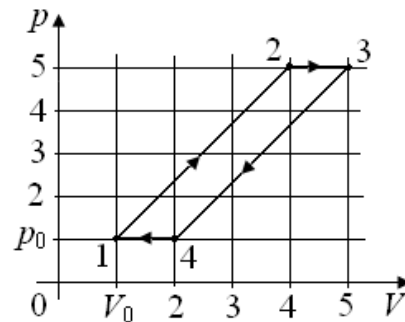


Рис. 1.46

1.129. С молекулами гелия проводится циклический процесс, показанный на рис. 1.46. Каков КПД этого цикла? Каков максимально возможный КПД тепловой машины, работающей между теми же наибольшей и наименьшей температурами, что и в данном цикле?

1.130*. Порция гелия участвует в цикле 1-2-3-1. На участке 1-2 давление постоянно, а температура увеличивается на 50 К; на участке 2-3 газ охлаждается на 80 К при $V = \text{const}$; на участке 3-1 газ сжимают адиабатно. Найти КПД цикла.

1.131. Над гелием проводят цикл Карно. КПД цикла $\eta = 50\%$. Найти отношение $A_{\text{хол}}/A$, где $A_{\text{хол}}$ – работа холодильника при изотермическом сжатии газа, A – работа газа за цикл.

1.132. Идеальный газ из исходного состояния: $V_1 = 3$ л, $p_1 = 1$ атм, $T_1 = 300$ К, нагрели до температуры $T_2 = 400$ К так, что его объём менялся пропорционально температуре. Найти работу газа в этом процессе.

1.133*. Моль одноатомного газа, взятого при температуре $T = 273$ К, сжали по объёму в 2 раза. При этом его температура возросла на 205 К. Процесс провели так, что на диаграмме (p, V) он изображается прямой линией. Определить работу газа и изменение его внутренней энергии.

1.134*. Давление и объём моля идеального одноатомного газа из исходного состояния уменьшают пропорционально до некоторых значений. Затем давление газа изохорно увеличивают так, что температура газа становится равной исходной. Определить отношение теплоты Q_- , отданной газом, к теплоте Q_+ , полученной им.

1.135*. В атмосферном воздухе (давление воздуха $p_0 = 100$ кПа) установлен цилиндр с тяжёлым поршнем массой $m = 20$ кг. Площадь поршня $S = 10$ см². Под поршнем находится одноатомный газ с тем же давлением p_0 . От сползания вниз поршень удерживается на опорах на высоте $L = 20$ см от дна (рис. 1.47). В результате медленного нагрева газа поршень сместился вверх на расстояние $h = 4$ см. Какое тепло Q получил газ?

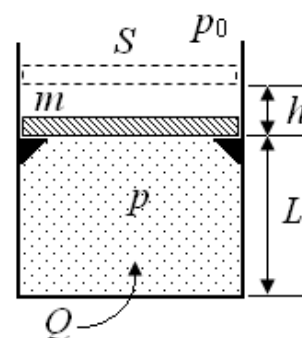


Рис. 1.47

1.136*. В цилиндре под лёгким поршнем находится одноатомный газ под давлением $p_0 = 100$ кПа. Исходная высота столба газа $L = 20$ см, площадь поршня $S = 10$ см² (рис. 1.48). В результате медленного нагрева газа поршень сместился вверх на расстояние $h = 4$ см. При движении по цилиндру поршень испытывает силу трения $F_{\text{тр}} = 200$ Н. Какое тепло Q получил газ? Внешнее давление – атмосферное $p_0 = 100$ кПа.

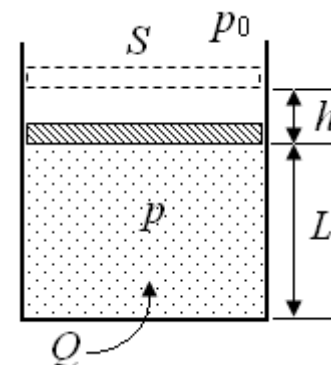


Рис. 1.48

1.137*. В горизонтальном цилиндре сечением $S = 25$ см² с подвижным поршнем находится идеальный газ под давлением $p_1 = 400$ кПа. Сначала поршень установлен на расстоянии $L = 30$ см от дна цилиндра. При медленном нагреве газ получил $Q = 1650$ Дж тепла, в результате чего поршень сместился на некоторое расстояние x . Найти это смещение, если при движении поршня на него постоянно действовала сила трения $F_{\text{тр}} = 3$ кН.

1.138*. В процессе $pV^2 = \text{const}$ температура гелия уменьшилась в три раза, а его внутренняя энергия изменилась на 50 Дж. Минимальное давление гелия в этом процессе $p_{\min} = 100$ кПа. Найти: 1) максимальное давление гелия p_{\max} ; 2) объём гелия V_2 в конечном состоянии.

1.139*. Найти молярную теплоёмкость C одноатомного газа в процессе, при котором давление газа изменяется пропорционально его объёму.

1.140*. Найти молярную теплоёмкость одноатомного газа, расширяющегося по закону $pV^n = \text{const}$. При каком n теплоёмкость $C = 0$, $C < 0$?

1.141*. Моль гелия нагревают от температуры T_1 до T_2 . Процесс проводят так, что давление гелия пропорционально его объёму. Определить работу гелия и его теплоёмкость в этом процессе.

1.142*. При расширении моля гелия из состояния 1 в 2 его давление менялось пропорционально объёму, а плотность уменьшилась в два раза. При этом гелий получил $Q = 20$ кДж тепла. Найти его исходную температуру T_1 .

1.143*. Моль гелия нагревают от температуры T_1 до T_2 . Процесс проводят по закону $p^2V = \alpha$ ($\alpha = \text{const}$). Определить работу гелия и его теплоёмкость в этом процессе.

1.144*. Найти молярную теплоёмкость C одноатомного газа в процессе, при котором $T = \alpha p^2$ (α – постоянная).

1.145*. Моль гелия расширяется в процессе $pV^2 = \alpha$ ($\alpha = \text{const}$). Определить работу гелия, если его начальная температура T_1 , а конечная T_2 . Найти теплоёмкость гелия в этом процессе.

1.146*. Моль гелия расширяется от объёма $V_1 = 10$ л до объёма $V_2 = 10,1$ л, а его давление при этом уменьшается от $p_1 = 1,0$ атм до $p_2 = 0,985$ атм. Определить теплоёмкость гелия в этом процессе.

1.147*. Найти теплоёмкость и работу моля гелия в процессе, при котором $p = \alpha V^n$ (α и n – постоянные), а температура меняется от T_1 до T_2 .

1.148. Теплоизолированная трубка запаяна с двух концов и разделена на две равные части пористой перегородкой. В левом конце трубки находится 2 моля гелия, а в правой – 2 моля аргона при равных температурах. Атомы гелия могут проникать через перегородку, а атомы аргона нет. Найти отношение внутренних энергий газов слева и справа от перегородки после установления термодинамического равновесия.

1.149*. Найти среднюю молярную теплоемкость одноатомного газа в процессе, показанном на рис. 1.49.

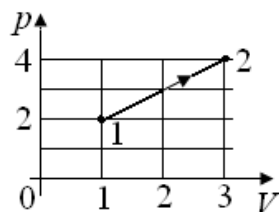


Рис. 1.49

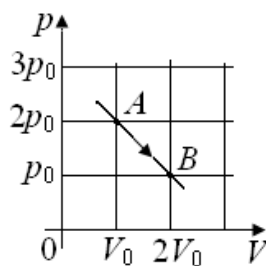


Рис. 1.50

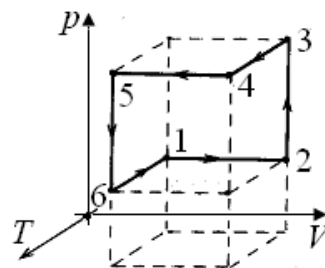


Рис. 1.51

1.150*. С молем одноатомного газа проводят процесс, показанный на рис. 1.50. Найти теплоёмкость газа в точках A и B . При каких V теплоёмкость газа C максимальна, а при каких $C = 0$?

1.1519. Над гелием проводят шестистадийный циклический процесс, показанный на рис. 1.51. Координаты точки 1: p, V, T ; координаты точки 4: $3p, 3V, 3T$. Найти изменение внутренней энергии газа ΔU_{ij} ($i, j = 1, \dots, 6$) на каждой стадии.

1.152. В каком из двух циклов: 1-2-3-1 или 3-2-4-3 (рис. 1.52) – газ совершает бóльшую работу?

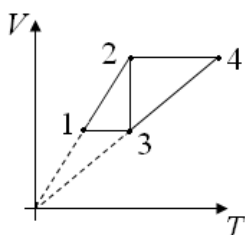


Рис. 1.52

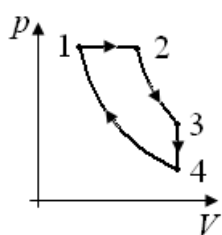


Рис. 1.53

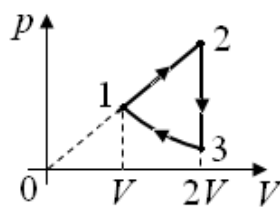


Рис. 1.54

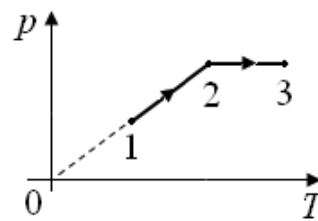


Рис. 1.55

1.153. С молем одноатомного идеального газа проводится циклический процесс, показанный на рис. 1.53, где участки 2-3 и 4-1 – адиабаты, температуры $T_3 = 540$ К, $T_4 = 300$ К. За цикл газ получает 4 кДж тепла. Определить КПД цикла.

1.154. Над одноатомным идеальным газом проводится циклический процесс, показанный на рис. 1.54, где участок 3-1 – адиабата. Известно, что работа расширения газа $A_{12} = 2500$ Дж, а работа внешних сил при сжатии $A'_{31} = 500$ Дж. Определить КПД цикла.

1.155. С молем одноатомного идеального газа проводится процесс 1-2-3, показанный на рис. 1.55. Температуры $T_1 = 300$ К, $T_2 = 600$ К, $T_3 = 900$ К. Определить теплоту Q , полученную газом в этом процессе.

1.156*. Найти степень диссоциации δ азота, если для него (т. е. для смеси молекулярного и атомарного азота) величина $\gamma = c_p/c_V = 1,47$.

1.157*. Найти степень диссоциации δ кислорода, если удельная теплоёмкость смеси молекулярного и атомарного кислорода $c_p = 1,05$ кДж/(кг·К).

1.158*. Гелий нагревают от температуры T_0 . Процесс нагрева проводят так, что его молярная теплоёмкость зависит от температуры по закону $C = R(T/T_0)$. Найти: 1) температуру T_1 , при которой объём газа минимален; 2) температуру T_2 , при которой работа газа A оказалась равной нулю. Изобразить графики $Q(T)$, $A(T)$ и $\Delta U(T)$.

1.159. С молем одноатомного идеального газа проводится процесс 1-2-3, показанный на рис. 1.56. В этом процессе $V_2 = 2V_1$, $V_3 = 3V_1$, температура $T_1 = 200$ К. Найти: 1) температуры T_2 и T_3 ; 2) работу A_{123} и полученное газом тепло Q_{123} в этом процессе.

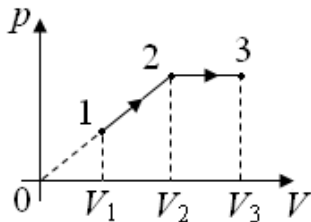


Рис. 1.56

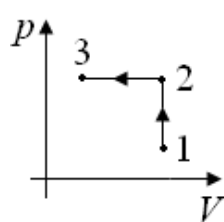


Рис. 1.57

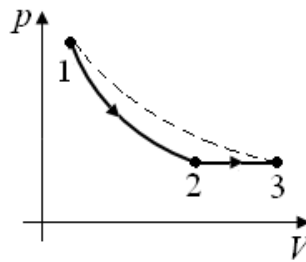


Рис. 1.58

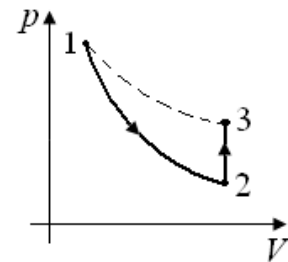


Рис. 1.59

1.160. Над молем идеального газа совершают процесс, показанный на рис. 1.57. На изобаре 2-3 газ выделяет столько же тепла $Q = 3675$ Дж, сколько поглощает на изохоре 1-2. Исходная температура газа $T_1 = 27^\circ\text{C}$. Найти конечную температуру газа T_3 , если его теплоёмкость $C_V = 21$ Дж/(моль·К).

1.161. В процессе 1-2-3 гелий расширяется сначала адиабатно, а затем изобарно, как показано на рис. 1.58, при этом $T_3 = T_1$, а работа расширения $A_{13} = 500$ Дж. Найти работы газа A_{12} и A_{23} на этапах расширения.

1.162. С гелием проводится процесс 1-2-3, показанный на рис. 1.59, где 1-2 - адиабата, а точки 1 и 3 лежат на изотерме. Определить работу газа A_{12} на адиабате, если на изохоре он получил тепло $Q_{23} = 400$ Дж.

1.163. С молем одноатомного идеального газа проводят цикл, состоящий из изотермического расширения, изохорного охлаждения и адиабатного сжатия. На изотерме газ совершает работу A , а при изохорном процессе его температура понижается на ΔT . Определить КПД цикла.

1.164. Процесс расширения одного моля азота в $n = 2$ раза проведён так, что давление газа росло пропорционально его объёму. Определить изменение энтропии азота.

1.165*. Моль идеального трёхатомного газа совершает цикл Карно, причём объём газа в цикле меняется в 8 раз. Найти работу газа за цикл, если температуры холодильника и нагревателя $T_x = 4^\circ\text{C}$, $T_n = 131^\circ\text{C}$.

1.166. Водород совершает цикл Карно. Определить КПД цикла, если при адиабатном расширении объём газа увеличивается в $n = 2$ раза.

1.167. $m = 2$ г водорода сжимают так, что его давление возрастает в 2,64 раза, а объём уменьшается в 2 раза. Найти изменение его энтропии.

1.168. $m = 2$ г водорода сжимают изотермически, увеличивая его давление в 2 раза. Определить изменение его энтропии.

1.4. Фазовые превращения.

Уравнение теплового баланса

Во всех задачах этого раздела теплоёмкости сосудов и тепловые потери не учитывать.

Табличные данные, используемые при решении задач этого раздела:

- 1) Удельные теплоёмкости: *воды* $c_v = 4,2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К);
льда $c_l = 2,1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К);
стали $c_{ст} = 0,46 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К).
- 2) Удельная теплота парообразования *воды* $r = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг.
- 3) Удельная теплота плавления *льда* $\lambda = 330 \cdot 10^3$ Дж/кг.

1.169. Кипятильник мощностью $P = 420$ Вт нагревает стакан воды от 20°C до кипения за время $t = 500$ с. Определить КПД η кипятильника в стакане с водой, если масса воды $m = 250$ г.

1.170. Один кипятильник нагревает воду до кипения за $t_1 = 12$ мин, а второй – за $t_2 = 6$ мин. За сколько минут нагреют воду до кипения оба кипятильника вместе?

1.171. Кипятильник нагревает воду от температуры $T_1 = 20^\circ\text{C}$ до $T_2 = 100^\circ\text{C}$ за время $t_1 = 12$ мин. За сколько минут он обратит в пар половину этой воды?

1.172*. На электроплитке мощностью $P = 1$ кВт кипит чайник с водой. Найти скорость выхода пара из носика чайника. Сечение носика $S = 1$ см². Пар считать идеальным газом, давление на конце носика $p = 1$ атм, вся энергия плитки передаётся воде.

1.173. В воде массой $m_v = 2$ кг при 0°C плавает лёд массой $m_l = 1$ кг. Через воду пропускают пар при температуре 100°C , лёд тает и вода нагревается до $T_0 = 80^\circ\text{C}$. Определить массу пара m_n .

1.174. В воду массой $m_{\text{в}} = 1$ кг при температуре $T_1 = 20$ °С опустили кусок мокрого снега массой $m_{\text{с}} = 200$ г. Когда снег растаял, температура воды стала $T_0 = 10$ °С. Сколько воды ($m_{\text{х}}$) было в снеге?

1.175. В сосуд, содержащий $m_{\text{в}} = 2$ кг воды при температуре $T_1 = 20$ °С, опускают кусок стали массой $m_{\text{ст}} = 1$ кг с температурой $T_2 = 530$ °С. Вода нагревается до $T_0 = 30$ °С и часть её обращается в пар. Найти массу пара $m_{\text{п}}$.

1.176. В цилиндрической колбе под лёгким поршнем находится $m = 300$ г воды при температуре 20 °С. Воде сообщили $Q = 102$ кДж тепла. На какую высоту h поднимется поршень, если его площадь $S = 50$ см² ?

1.177. Нагретый стальной куб положили на лёд при 0 °С, и куб полностью погрузился в него. Оценить температуру куба. Плотность стали $\rho_{\text{ст}} = 7800$ кг/м³, плотность льда $\rho_{\text{л}} = 900$ кг/м³.

1.178*. Два одинаковых кирпича, нагретых до 100 °С, поочерёдно опускают в воду с начальной температурой 10 °С. Первый кирпич нагрел воду до 40 °С. Какой установится температура воды после опускания в неё второго кирпича при условии, что первый остаётся в воде?

1.179. В сосуде с теплоизолированными стенками есть вода при 80 °С. Когда в неё бросили кусок льда массой $m = 100$ г и он растаял, температура воды стала 60 °С. Когда в неё бросили ещё такой же кусок льда и при той же температуре, что и у первого, вода охладилась до 42 °С. Определить исходную массу m_0 воды в сосуде.

1.180. В сосуд, содержащий $m_{\text{в}} = 2$ кг воды при температуре $T_{\text{в}} = 20$ °С, положили $m_{\text{л}} = 1$ кг льда при температуре $T_{\text{л}} = -20$ °С. Весь ли лёд растает? Если да, то какая температура установится в сосуде? А если нет, то сколько льда ($m_{\text{х}}$) останется?

1.181*. Можно ли литром горячей воды нагреть литр холодного молока, так чтобы конечная температура молока стала выше конечной температуры воды? Плотности и удельные теплоёмкости молока и воды считать одинаковыми.

1.182*. Человек массой $m = 90$ кг скользит по льду на одном коньке. Известно, что лёд тает под коньком на глубину $h = 0,03$ мм. Ширина конька $d = 2$ мм. Плотность льда $\rho = 900$ кг/м³, а его удельная теплота плавления $\lambda = 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг. Полагая теплопроводность льда несущественной, определить коэффициент трения k конька о лёд.

1.183*. В герметичном сосуде с жёсткими стенками находится $m_0 = 3$ кг воды при температуре $T_0 = 120^\circ\text{C}$. Сосуд открыли в атмосферу ($p_0 = 10^5$ Па) и вода закипела. Сколько воды выкипело после того, как кипение прекратилось? Теплоёмкостью сосуда и потерями тепла через стенки пренебречь.

1.184*. Медленно понижая температуру чистой воды, её можно переохладить, т. е. охладить ниже 0°C . Сосуд переохлаждённой воды с температурой $T = -8^\circ\text{C}$ встряхивают, и часть воды тут же замерзает. 1) Найти массовую долю ($m_{\text{л}}/m$) замёрзшей воды. 2) Какую температуру должна иметь переохлаждённая вода, чтобы полностью превратиться в лёд?

1.185*. Лёд при 0°C , находящийся в теплонепроницаемой оболочке, подвергнут сжатию до давления 1100 атм, при котором его температура плавления равна -8°C . Какая часть льда ($m_{\text{х}}/m$) растает?

1.186. В теплоизолированной колбе находится вода при 0°C . При откачивании из колбы воздуха вода интенсивно испаряется и, охлаждаясь, её остатки превращаются в лёд. Найти отношение массы льда $m_{\text{х}}$ к исходной массе воды m , полагая, что удельная теплота парообразования при 0°C такая же, как и при 100°C .

1.187*. В жёстком теплоизолированном баллоне находится азот при температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$ и давлении $p_0 = 100$ кПа. В баллон добавили немного жидкого азота при температуре кипения $T_1 = -196^\circ\text{C}$, который быстро испарился, после чего температура в баллоне стала $T_2 = -140^\circ\text{C}$, а давление $p_2 = 68$ кПа. Зная, что для газообразного азота молярная теплоёмкость $C_V = 20,8$ Дж/(моль·К), найти молярную теплоту испарения λ жидкого азота.

1.188*. В высокий прямоугольный сосуд квадратного сечения, разделенный вертикальными перегородками на три секции в отношении 2:1:1, как показано на рис. 1.60, налили «три воды» до одинакового уровня. Начальная температура воды в секциях: $T_1 = 80^\circ\text{C}$, $T_2 = 40^\circ\text{C}$, $T_3 = 20^\circ\text{C}$. Полагая, что внешние стенки сосуда тепло не проводят, найти установившуюся температуру T_0 воды во всех секциях.

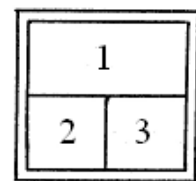


Рис. 1.60

1.189*. В высокий сосуд квадратного сечения, разделённый перегородками на три секции в отношении 2:1:1, как показано на рис. 1.60, налили «три воды» до одинакового уровня. Начальные температуры воды в секциях: $T_1 = 80^\circ\text{C}$, $T_2 = 40^\circ\text{C}$, $T_3 = 20^\circ\text{C}$. Внешние стенки сосуда тепло не проводят, а внутренние перегородки сделаны из одинакового теплопроводящего материала. Вода в каждой секции постоянно

перемешивается. Через некоторое время τ вода в секции 1 остыла на 1°C . На сколько градусов изменятся температуры воды в секциях 2 и 3 ?

1.190*. Два сосуда – №1 и №2 – с теплоизолированными стенками содержат по 3 кг воды при температурах $T_{01} = 50^\circ\text{C}$ и $T_{02} = 20^\circ\text{C}$. Из сосуда №1 в №2 переливают $\Delta m = 1$ кг горячей воды, а после перемешивания переливают 1 кг воды обратно из 2 в 1. В результате этой первой пары переливаний количество воды в сосудах осталось прежним, но вода в соуде №2 стала немного теплее, а в сосуде №1 – немного холоднее. Сколько таких пар переливаний надо совершить, чтобы разность температур в сосудах ΔT стала меньше 1° ? Потерями тепла при переливаниях пренебречь.

1.191*. Имеются две жидкости – вода и молоко – одинаковой массы и одинаковой теплоёмкости, но молоко холодное, с температурой $T_0 = 0^\circ\text{C}$, а вода горячая, с температурой $T_{100} = 100^\circ\text{C}$. Ставится задача: путём теплообмена нагреть молоко водой как можно больше. Если просто привести их в тепловой контакт, то температуры молока и воды станут одинаковыми: $T_{\text{общ}} = (T_0 + T_{100})/2$. Но температуру молока $T_{\text{м}}$ можно сделать и выше $T_{\text{общ}}$ специальной конструкцией теплообменника: горячую воду надо медленно пропускать по длинной трубке, проходящей через молоко. Пренебрегая

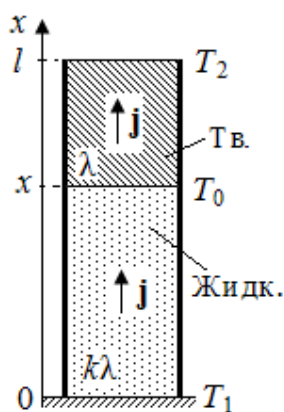


Рис. 1.61

различными тепловыми потерями в таком теплообменнике, определить конечную температуру молока $T_{\text{м}}$.

1.192*. Вертикальная длинная кирпичная труба заполнена чугуном. Нижний конец трубы поддерживается при температуре $T_1 > T_0$, а верхний при $T_2 < T_0$, где T_0 – температура плавления чугуна (рис. 1.61). Теплопроводность у расплавленного чугуна в k раз больше, чем у твёрдого. Какая часть чугуна находится в расплавленном состоянии?

1.193. Электронагреватель установлен в трубе с проточной водой (рис. 1.62). Производительность установки (расход воды в трубе) $q = \Delta V / \Delta t = 0,1$ л/с. Какую мощность P должен иметь нагреватель, чтобы при температуре входящей воды $T_1 = 18^\circ\text{C}$ температура выходящей T_2 была бы 42°C ?

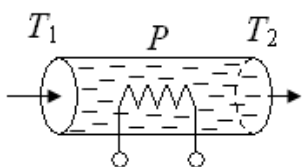


Рис. 1.62

1.194. Оценить, на сколько лет при современном уровне потребления энергии на Земле человечеству хватило бы тепловой энергии, выделенной из мирового океана при его охлаждении на 1° . Принять: 1) сейчас на Земле ежегодно сжигается 10 млрд тонн условного топлива (в пересчёте на нефть); 2) мировой океан занимает $2/3$ поверхности Земли, а его средняя глубина $h = 4$ км.

1.195*. Железный шарообразный астероид радиусом $R = 10$ см со скоростью $v = 10$ км/с входит в атмосферу Земли. Из-за трения о воздух он разогревается, плавится и сгорает в атмосфере. Оценить «время его жизни», т. е. время, за которое он разогреется от температуры $T_0 = -270^\circ\text{C}$ до плавления ($T_{\text{пл}} = 1530^\circ\text{C}$) и расплавится, полагая, что основной его разогрев и плавление происходят на высоте $h = 50$ км (рис. 1.63), где плотность воздуха $\rho = 1$ г/м³.

Какое расстояние в атмосфере пролетит такой астероид за «время его жизни» в ней? Удары молекул газа об астероид считать абсолютно неупругими.

Характеристики железа:

плотность $\rho_{\text{Fe}} = 7800$ кг/м³,

удельная теплоёмкость $c = 460$ Дж/(кг·К),

удельная теплота плавления $q = 270 \cdot 10^3$ Дж/кг.

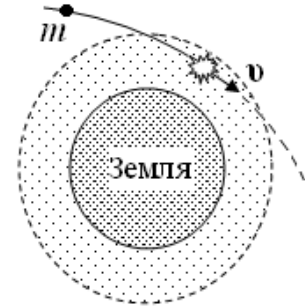


Рис. 1.63

1.5. Пар и его характеристики

Таблица давлений и плотностей насыщенного водяного пара при разных температурах

$T, ^\circ\text{C}$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$p^{\text{нас}}, \text{кПа}$	0,61	0,70	0,81	0,93	1,07	1,22	1,40	1,60	1,81	2,06	2,33
$\rho^{\text{нас}}, \text{г/м}^3$	4,8	5,6	6,4	7,3	8,3	9,4	10,7	12,1	13,6	15,4	17,3

$T, ^\circ\text{C}$	22	25	30	40	50	60	70	80	90	100	200
$p^{\text{нас}}, \text{кПа}$	2,64	3,15	4,23	7,35	12,3	19,9	31,0	47,3	70,0	101	1570
$\rho^{\text{нас}}, \text{г/м}^3$	20,0	24,0	30,4	51,2	82,9	138	198	296	423	598	7870

Относительная влажность воздуха при температуре T : $\varphi_T = p_T / p_T^{\text{нас}}$;

эквивалентная формула: $\varphi_T = \rho_T / \rho_T^{\text{нас}}$.

Давление насыщенного пара воды при $T = 100^\circ\text{C}$: $p_{100}^{\text{нас}} = 1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па}$.

Закон Дальтона: $p = p_1 + p_2 + \dots + p_N$.

1.196. Так как молярная масса водяного пара (18 г/моль) значительно меньше молярной массы воздуха (29 г/моль), то почему пар не используют для наполнения воздушных шаров? Ведь он гораздо доступнее, чем, например, гелий, – его можно получать простым испарением воды.

1.197. Два одинаковых баллона заполнены воздухом: один сухим, а другой влажным, но при одинаковых температурах и давлениях. Какой баллон тяжелее?

1.198. При каком давлении вода будет кипеть при 20°C ?

1.199. При какой температуре вода будет кипеть на вершине Эвереста, где давление $p \approx 0,3$ атм?

1.200. Закрытый сосуд разделён перегородкой на две секции объёмами $V_1 = 20$ л и $V_2 = 30$ л, в которых находится воздух с одинаковыми температурами, но с разными относительными влажностями: $\varphi_1 = 30\%$ и $\varphi_2 = 40\%$ соответственно. Перегородку убирают. Какой станет относительная влажность воздуха в сосуде после перемешивания воздуха?

1.201. Воздух имеет температуру $T = 22$ °С и относительную влажность $\varphi = 50\%$. Сколько граммов пара содержится в 1 м^3 такого воздуха?

1.202. Температура воздуха $T = 30$ °С, давление $p_0 = 100$ кПа, влажность $\varphi = 47\%$. Сколько процентов молекул H_2O содержит воздух?

1.203. Температура воздуха в комнате $T_1 = 20$ °С. Роса на зеркале гигрометра появилась при $T_2 = 10$ °С. Какова влажность воздуха в комнате?

1.204. При температуре $T_1 = 20$ °С относительная влажность воздуха $\varphi_1 = 60\%$. Какова она будет при уменьшении температуры до $T_2 = 14$ °С? При какой температуре выпадет роса? Сколько воды в виде росы выделится из каждого кубометра воздуха при понижении его температуры до 8 °С?

1.205. На улице при 18°C влажность воздуха $\varphi = 60\%$. При небольшой нагрузке человека через его лёгкие проходит около 15 литров воздуха в минуту. Выдыхаемый воздух имеет температуру 34°C при влажности 100% . Плотность насыщенного пара при 18°C равна 15 г/м^3 , а при 34°C – 39 г/м^3 . Какую массу воды теряет человек за час только за счёт дыхания?

1.206. В цилиндре под поршнем находится $m = 18$ г водяного пара при температуре $T = 100$ °С и давлении $p = 60$ кПа. Какая масса пара Δm сконденсируется в воду при изотермическом уменьшении объёма цилиндра в 5 раз?

1.207*. Камера содержит воздух с относительной влажностью $\varphi = 75\%$. При изотермическом уменьшении объёма камеры в 4 раза в ней выпало $m = 10$ г воды. Найти исходную массу пара m_0 в камере.

1.208. Камера содержит воздух с влажностью $\varphi = 60\%$, температурой $T = 100^\circ\text{C}$ и давлением $p = 100$ кПа. Каким станет давление в камере после изотермического уменьшения её объёма в $2,5$ раза?

1.209. В цилиндре под поршнем находится m граммов воды и столько же пара над ней при температуре $T = 100^\circ\text{C}$. Объём цилиндра изотермически увеличили в 5 раз. Найти давление пара в цилиндре и его влажность.

1.210. В герметичной комнате объёмом $V = 25 \text{ м}^3$ температура воздуха $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, а относительная влажность $\varphi = 30 \text{ \%}$. В комнате разлили стакан воды ($m = 250 \text{ г}$). Какая влажность φ_2 будет в комнате после того, как вся вода испарится? Температура воздуха не меняется.

1.211. В баллоне объёмом $V = 31 \text{ л}$ находится смесь насыщенного водяного пара и гелия. Давление смеси $p = 200 \text{ кПа}$, температура $T = 373 \text{ К}$. Определить количество молей гелия.

1.212*. В баллоне объёмом $V = 34,1 \text{ л}$ находится азот и 1 моль воды. Когда баллон нагрели до $100 \text{ }^\circ\text{C}$, давление в нём оказалось равным 2 атм. Определить количество азота в баллоне.

1.213*. Закрытый сосуд с жёсткими стенками содержит воздух при температуре $T_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\varphi_1 = 80 \text{ \%}$. Какова будет относительная влажность воздуха φ_2 при его нагревании до $T_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$?

1.214*. В цилиндре под поршнем находится воздух, имеющий температуру $T_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ и влажность $\varphi_1 = 60 \text{ \%}$. Воздух нагревают до $T_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ и уменьшают его объём в три раза. Какой станет его влажность φ_2 ? Во сколько раз надо было сжать воздух, чтобы в цилиндре появилась роса?

1.215*. В цилиндре под поршнем находится воздух, имеющий объём $V_1 = 2 \text{ л}$, температуру $T_1 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительную влажность $\varphi_1 = 40 \text{ \%}$. Воздух изотермически сжимается. При каком объёме V_2 начнется конденсация пара? Сколько росы (Δm) выпадет при сжатии воздуха до $V_3 = 0,5 \text{ л}$?

1.216. В откачанный герметичный баллон объёмом $V = 10 \text{ л}$ поместили пробирку с $m_0 = 10 \text{ г}$ воды. Баллон вместе с пробиркой нагрели до температуры $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Сколько воды (Δm) останется в пробирке?

1.217*. Сосуд объёмом $V = 10 \text{ л}$ заполнен сухим воздухом при давлении $p_1 = 100 \text{ кПа}$ и температуре $T_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Каким станет давление p_2 в сосуде, если в него налить $m = 10 \text{ г}$ воды и нагреть до температуры $T_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$?

1.218*. В стеклянную банку налили около половины воды при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Затем ее герметично закрутили крышкой и нагрели до 100°C . Найти силу, срывающую крышу с банки, если площадь крышки $S = 47 \text{ см}^2$. Атмосферное давление $p_0 = 100 \text{ кПа}$.

1.219*. Закрытый с торцов цилиндр объёмом $V = 10 \text{ л}$ разделен на две части лёгким свободно перемещающимся поршнем. В одной части находится 1 моль воды, а в другой 1 моль водорода. Температура T в обеих частях одинакова и равна 373 К . Найти давление p в цилиндре.

1.220*. Оценить среднее расстояние между молекулами насыщенного пара воды при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.221*. Во сколько раз отличается плотность влажного воздуха при давлении $p_0 = 1\text{ атм}$ и температуре $T = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ от плотности сухого при тех же условиях? Пар считать насыщенным.

1.222*. В цилиндре под поршнем находятся $0,5$ моля воды и $0,5$ моля пара. Жидкость и пар медленно нагревают при постоянном давлении так, что в конечном состоянии температура пара увеличивается на ΔT . Сколько теплоты было подведено к системе «жидкость-пар» в этом процессе? Молярная теплота испарения воды равна Λ , внутренняя энергия ν молей пара $U = 3\nu RT$.

1.223*. В сосуде объёмом 1 л находится 1 моль азота при давлении 1 атм . Азот медленно откачивают, поддерживая температуру сосуда постоянной. Сколько граммов азота останется в сосуде к тому моменту, когда давление в нём упадет вдвое?

1.224*. Паровой котёл содержит смесь воздуха и насыщенного пара. Температура в котле $T_1 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление $p_1 = 300\text{ кПа}$. Какое давление p_2 будет в котле после его охлаждения до температуры $T_2 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$?

1.225*. В герметичном баллоне находится смесь кислорода и водорода в равных объёмных долях (по 50%). Смесь имеет температуру $T_0 = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давление $p_0 = 100\text{ кПа}$. В результате реакции $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ образовался водяной пар. Вычислить давление p в баллоне после его охлаждения до исходной температуры.

Замечание. Условие данной задачи лишь слегка отличается от № 1.18.

1.226*. Герметичная камера содержит смесь кислорода и водорода при температуре $T_0 = 27^{\circ}\text{C}$ и давлении $p_0 = 1\text{ атм}$. Парциальные давления газов в камере одинаковы. Определить давление p внутри камеры после взрыва и охлаждения продуктов реакции до температуры $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ с учётом возможной конденсации водяного пара.

1.227*. В цилиндре под лёгким поршнем площадью $S = 1\text{ дм}^2$ при температуре $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ находится воздух с относительной влажностью $\varphi = 20\%$. Груз какой массы m надо положить на поршень, чтобы в цилиндре появилась роса? Температура в цилиндре не меняется.

1.228*. При относительной влажности воздуха $\varphi_1 = 40\%$ вода с блюдца испарилась за $t_1 = 40\text{ мин}$. За какое время это произошло бы при влажности воздуха $\varphi_2 = 80\%$ и той же температуре?

1.229*. Камера содержит влажный воздух при давлении $p_1 = 300$ кПа и немного воды. После изотермического увеличения объёма камеры в 2 раза относительная влажность воздуха в ней стала $\varphi = 80\%$, а давление уменьшилось до $p_2 = 180$ кПа. Определить температуру камеры T .

1.230*. Воздух с влажностью $\varphi = 90\%$ находится в закрытой камере под давлением $p_1 = 120$ кПа. При изотермическом сжатии воздуха в 2 раза давление в камере стало $p_2 = 160$ кПа. Определить температуру T в камере.

1.231*. В исходном состоянии при температуре $T = 100^\circ\text{C}$ влажный воздух имел давление $p_1 = 180$ кПа. После изотермического сжатия в 4 раза давление воздуха стало $p_2 = 540$ кПа. Найти относительную влажность воздуха φ в исходном состоянии.

1.232*. В запаянной с одного конца горизонтальной трубке находится воздух с относительной влажностью $\varphi = 0,8$, отделённый от атмосферы столбиком ртути длиной $H = 76$ мм. Какой станет влажность воздуха φ_1 , если трубку поставить вертикально открытым концом вниз? Давление атмосферы $p_0 = 760$ мм рт. ст., температура воздуха постоянна, ртуть из трубки не выливается.

Раздел 2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

2.1. Законы геометрической оптики

Показатели преломления: *воды*: $n = 1,33$;

стекла: $n = 1,6$;

воздуха при нормальных условиях: $n = 1,0003$.

Скорость света в прозрачной среде $v = c/n$.

2.1*. Что больше – облако или его полная тень на земле от Солнца?

2.2*. Солнце находится на небе под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту. Найти длину l полной тени на земле от вертикального столба диаметром $D = 20$ см, высотой $h = 20$ м. Угловой размер солнечного диска $\gamma = 32'$.

2.3*. Оценить, на каком расстоянии l человек потеряется из виду в чистом сосновом лесу. Принять средний диаметр стволов $D = 20$ см, а некоторое среднее расстояние между деревьями $a = 3$ м (т. е. на площади a^2 растёт в среднем одно дерево).

2.4*. В туче пыли видимость составляет $l = 50$ м. Средний размер пылинок $D = 5$ мкм. Оценить число пылинок в 1 мм^3 воздуха.

2.5. Какова должна быть минимальная высота вертикального зеркала, чтобы человек ростом h мог видеть свое изображение во весь рост? На какой высоте от пола должен находиться нижний край этого зеркала?

2.6. Человек смотрится в небольшое вертикально висящее зеркало. Большую ли часть себя увидит человек, если подойдет к зеркалу поближе?

2.7. Человек смотрится в зеркало, висящее на стене с небольшим наклоном (рис. 2.1). Построением изображения установить, какую часть себя будет видеть человек в зеркале.

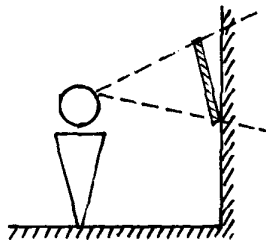


Рис. 2.1

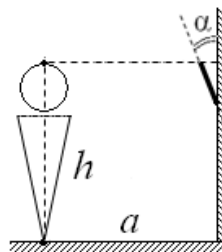


Рис. 2.2

2.8*. Человек ростом $h = 180$ см стоит перед небольшим зеркалом, которое висит на стене наклонно под углом $\alpha = 22,5^\circ$ к вертикали. Верхний край зеркала находится на уровне глаз человека (рис. 2.2). С какого наибольшего расстояния a человек увидит хотя бы малую часть своего изображения?

2.9. На полу у стены стоит плоское зеркало, наклонённое к стене под углом $\alpha = 26,6^\circ$, как показано на рис. 2.3. С какого наибольшего расстояния a от нижнего края зеркала должен стоять человек ростом $h = 180$ см, чтобы увидеть хотя бы малую часть своего изображения?

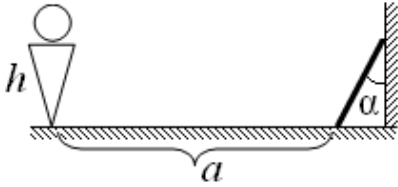


Рис. 2.3

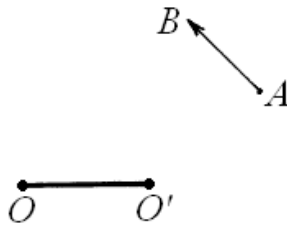


Рис. 2.4



Рис. 2.5

2.10. Найти построением область пространства, из которой наблюдатель может видеть в небольшом зеркале OO' изображение отрезка AB , расположенного как показано на рис. 2.4.

2.11. Два зеркала образуют двугранный прямой угол. На эту систему падает луч, перпендикулярный ребру угла. Как изменится направление луча после отражения от двух зеркал?

2.12. В прямоугольной комнате на соседних стенках висят картина и зеркало, как показано нарис. 2.5. Найти построением область в комнате, из которой человек может видеть картину в зеркале целиком.

2.13. На какой высоте h находится самолет A , если с башни высотой H он виден под углом α над горизонтом, а его изображение A' в озере видно под углом β (рис. 2.6)?

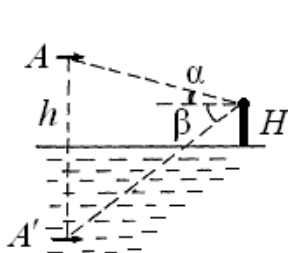


Рис. 2.6

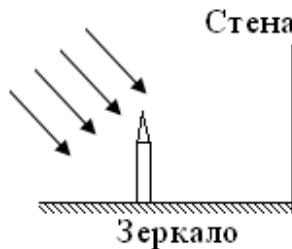


Рис. 2.7

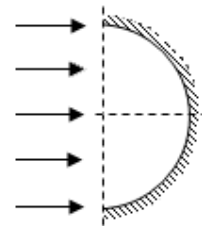


Рис. 2.8

2.14*. На горизонтальном зеркале, придвинутом к вертикальной стене, стоит карандаш (рис. 2.7). На зеркало падает параллельный пучок света. Построить тень карандаша на стене.

2.15*. На полуцилиндрическое зеркало падает широкий пучок света, параллельный плоскости симметрии зеркала (рис. 2.8). Найти максимальный угол α между лучами в отражённом пучке (угол расхождения).

2.16. На зеркальный шар горизонтально слева падает параллельный пучок света. Куда отразится больше света: влево или вправо?

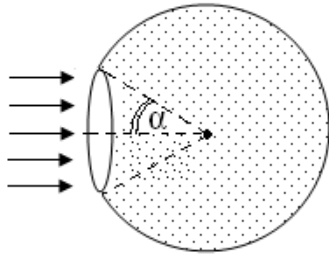


Рис. 2.9

2.17*. Зеркальная изнутри сфера имеет круглое отверстие с углом раствора 2α , в которое падает параллельный пучок света, перпендикулярный плоскости отверстия, как показано на рис. 2.9. Какая доля δ падающего света выйдет обратно через отверстие после *однократного* отражения?

2.18. На потолке находится точечный источник света, а прямо под ним на полу лежит небольшое круглое зеркальце, так что вокруг источника на потолке образован круглый зайчик. Зеркальце поднимают вертикально вверх со скоростью v . С какой скоростью растёт диаметр зайчика?

2.19*. Сидя на берегу моря, человек смотрит на закат Солнца. В некоторый момент диск Солнца скрылся за горизонтом. На какую высоту h надо подняться человеку, чтобы увидеть ровно половину солнечного диска? Угловой размер Солнца $\gamma = 32'$, радиус Земли $R = 6400$ км.

2.20*. При солнечном затмении мы видим, как на диск Солнца наползает чёткий диск Луны. При лунном затмении, когда Луна заходит в тень Земли, на лунном диске нет чёткой тени диска Земли: диск Луны просто темнеет, причём темнота перемещается с одного края диска на другой. Почему на лунном диске мы не наблюдаем чёткой тени Земли?

2.21. Лучи Солнца проходят через маленькую дырку в крыше сарая и дают зайчик на полу. Определить диаметр D зайчика, полагая, что солнце находится в зените. Высота сарая $h = 3$ м. Угловой размер солнечного диска $\gamma = 0,53^\circ$.

2.22*. Лучи Солнца (Солнце в зените) проходят через квадратную дырку в крыше сарая и дают зайчик на полу. Почему, если дырка маленькая, то зайчик круглый, а если большая, то он имеет форму дырки с размытыми краями?

2.23*. Почему солнечный зайчик на стене от маленького квадратного зеркальца – круглый, а от большого квадратного зеркала – квадратный?

2.24*. Лучи Солнца проходят через маленькую дырку в крыше сарая и дают на полу зайчик в форме эллипса. Малая ось эллипса $a = 4$ см, а большая $b = 6$ см. Определить расстояние h от крыши до пола и угол α Солнца над горизонтом, если известно, что угловой размер солнечного диска $\gamma = 0,53^\circ$.

2.25. Человек стоит перед зеркалом, закрыв правый глаз, и смотрит на своё изображение только левым. На изображение правого (закрытого) глаза в зеркале он накладывает небольшую бумажку. Что увидит человек, если он будет смотреть в зеркало только правым глазом, прикрыв левый?

2.26. На какое расстояние x сместится луч, прошедший через плоскопараллельную пластинку, если ее толщина h , показатель преломления n , а угол падения луча α ? При каком α смещение луча будет максимальным?

2.27. На стеклянную плоско-параллельную пластинку, имеющую толщину h и показатель преломления n , падает луч. Угол падения равен α . Нижняя поверхность пластинки посеребрена, так что от пластинки отражаются два параллельных луча. Найти их смещение x .

2.28. Круглый диск диаметром $D = 1$ м плавает на поверхности бассейна, а точно под центром диска на дне светит лампочка. При какой глубине бассейна h лампочку невозможно будет увидеть ни из какой точки над поверхностью бассейна?

2.29. Круглый диск диаметром $D = 3$ м плавает на поверхности воды в бассейне глубиной $h = 1$ м. Найти диаметр тени на дне бассейна: а) в солнечный день, считая солнце точечным источником; б) в пасмурный день, когда источником рассеянного света является вся "небесная полусфера".

2.30. Поверхность озера глубиной $h = 1$ м покрыта льдом со снегом, так что лёд можно считать не пропускающим свет. Во льду сделана прорубь в форме круга диаметром $D = 32$ см. Определить диаметр D_1 светлого пятна на дне, если озеро освещается рассеянным светом от всей небесной полусферы.

2.31. Под каким углом α луч должен падать на стекло с показателем преломления $n = 1,6$, чтобы преломлённый луч был перпендикулярен отражённому? Такой угол α называется *углом Брюстера*.

2.32*. Под каким углом α луч должен упасть на стекло ($n_{\text{ст}} = 1,6$), чтобы угол преломления β был в 2 раза меньше угла падения? Каков будет ответ, если при тех же условиях вместо стекла взять воду ($n_{\text{в}} = 1,33$)? Каковы ограничения на n , чтобы поставленное условие $\beta = \alpha/2$ было выполнено?

2.33. Если смотреть в кубический бак сверху под углом 45° , то полностью видно стенку AB , но не видно его дна (рис. 2.10). До какого уровня h надо налить в бак воды, чтобы из той же позиции было видно точку C , находящуюся на дне бака на расстоянии $l = 10$ см от угла B ?

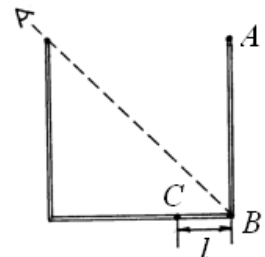


Рис. 2.10

2.34. Световод изготовлен в виде цилиндрического прозрачного волокна диаметром $D = 2$ мм. При каком минимальном радиусе r изгиба световода (рис. 2.11) свет, вошедший в световод перпендикулярно плоскости поперечного сечения, не выйдет через его боковую поверхность? Показатель преломления оптоволокна $n = 1,4$.

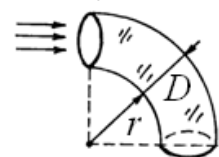


Рис. 2.11

2.35*. Длинная тонкая нить (световод) изготовлена из прозрачного материала с показателем преломления $n = 1,25$. Один из торцов нити прижат к источнику рассеянного света, а другой помещён на расстоянии $l = 5$ см от экрана. Найти радиус светового круга на экране.

2.36*. Параллельный пучок света падает на основание стеклянного конуса вдоль его оси. Радиус пучка $R = 1$ см равен радиусу основания конуса. Высота конуса $h = \sqrt{3}$ см. Вершиной конус касается экрана, перпендикулярного его оси. Найти площадь светлого пятна на экране.

2.37. Стеклянный шар радиусом $R = 10$ мм разрезан по диаметру. На диаметральную плоскость нормально падает параллельный пучок света. На каком расстоянии l от центра полушара пересекут главную оптическую ось лучи, прошедшие сферическую поверхность *на наибольшем удалении от оси*?

2.38. Из стеклянного шара радиусом $R = 10$ мм вырезан сегмент. На плоскую грань сегмента нормально падает параллельный пучок света. Каким должен быть радиус сегмента r , чтобы не было полного внутреннего отражения?

2.39*. Из стеклянного шара радиусом R вырезан тонкий сегмент (его толщина $h \ll R$), образующий тонкую плосковыпуклую линзу. На плоскую границу линзы нормально падает узкий пучок лучей. Показать, что если радиус пучка $r \ll R$, то все его лучи после прохождения сегмента сойдутся в одной точке F , называемой *фокусом линзы*, и найти расстояние f от линзы до фокуса. Показатель преломления стекла равен n .

2.40*. Установить, может ли какой-нибудь луч, вошедший в стеклянный шар из воздуха, испытать в шаре полное внутреннее отражение.

2.41*. Если смотреть на капиллярную трубку сбоку, то видимый радиус капилляра $r_0 = 0,8$ мм. Каков истинный радиус r капилляра?

2.42. При каком показателе преломления стекла n узкий параллельный пучок света, падающий нормально на поверхность стеклянного шара, после преломления пересечётся в диаметрально противоположной точке поверхности шара?

2.43. Угол падения луча на поверхность стеклянного шара $\alpha = 45^\circ$. Определить угол γ между падающим лучом и лучом, вышедшим из шара, если показатель преломления стекла $n = 1,41$.

2.44*. На сферическую поверхность, за которой находится стекло безграничных размеров, падает нормально узкий пучок света. На каком расстоянии f от поверхности пучок пересечется в одной точке, если показатель преломления стекла равен n ?

2.45*. Тонкостенный стеклянный шар радиусом $R = 80$ мм заполнен водой с показателем преломления $n = 4/3$. В воде находится точечный источник света s на расстоянии $a = 20$ см от стенки шара. На каком расстоянии b от стенки будет казаться этот источник (а точнее – его изображение s'), если смотреть на шар извне вдоль линии Os (рис. 2.12) ?

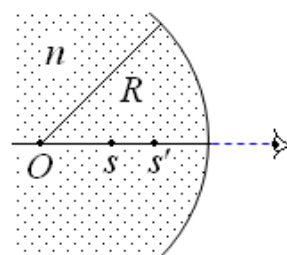


Рис. 2.12

2.46. Если толстую канцелярскую скрепку держать на 2-3 см от книжного текста, то при наблюдении одним глазом она закрывает одну букву. Но если скрепку держать на 2-3 см от глаза, то она становится как бы полупрозрачной и все буквы через неё хорошо видны. Почему?

2.47. Одна из непрозрачных ширм закрывает зеркало, а другая – треугольную стеклянную призму (рис. 2.13, а, б). На рисунках показаны два входных луча 1 и 2 и соответствующие выходные лучи 1' и 2'. За какой ширмой находится зеркало, а за какой призма?

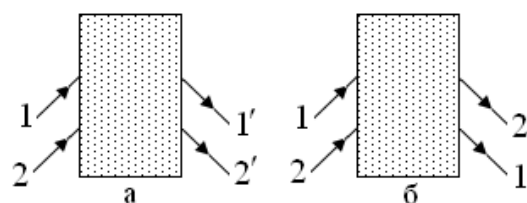


Рис. 2.13

2.48. Луч падает нормально на боковую грань AC стеклянной призмы с преломляющим углом $\varphi = 30^\circ$ (рис. 2.14). Найти угол δ отклонения луча от исходного направления после прохождения призмы через грани AC и AB . Показать, что при малом преломляющем угле φ отклонение $\delta = \varphi(n - 1)$.

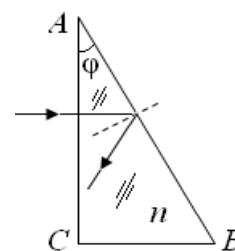


Рис. 2.14

2.49*. Луч падает нормально на грань AC стеклянной призмы с преломляющим углом φ (рис. 2.14), отражается от зеркальной грани AB и снова попадает на грань AC . При каком угле φ луч не выйдет из призмы через грань AC ? Показатель преломления стекла $n = 1,624$.

2.50*. Параллельный пучок света падает нормально на грань AB стеклянной бипризмы с малым преломляющим углом φ (рис. 2.15). Размер $AB = 2a = 5$ см. В результате преломления света в середине экрана, расположенного на расстоянии $l = 1$ м от бипризмы, образуется тёмная полоса шириной $d = 1$ см. Определить преломляющий угол φ . Показатель преломления стекла $n = 1,57$.

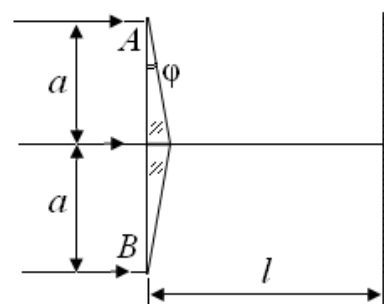


Рис. 2.15

2.51. Сечение стеклянной призмы имеет форму равностороннего треугольника. Луч падает на одну из граней перпендикулярно ей. Определить угол δ отклонения луча от исходного направления.

2.52. Сечение стеклянной призмы имеет форму равностороннего треугольника. При каком угле падения луча на одну из граней он не выйдет из второй грани?

2.53*. Сечение стеклянной призмы имеет форму равнобедренного треугольника. Одна из равных граней посеребрена. Луч падает нормально на другую, не посеребрённую грань, и после двух отражений выходит через основание призмы перпендикулярно ему. Найти преломляющий угол φ призмы.

2.54*. Луч проходит через стеклянную призму (через клин) с малым преломляющим углом φ и показателем преломления n . Определить угол δ отклонения луча от исходного направления при небольших углах падения.

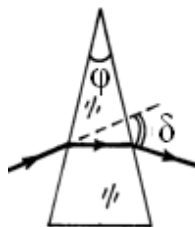


Рис. 2.16

2.55*. Преломляющий угол призмы $\varphi = 45^\circ$. Луч света выходит из призмы под тем же углом, под которым он в неё входит (рис. 2.16), при этом луч отклоняется от исходного направления на угол $\delta = 25^\circ$. Определить показатель преломления n материала призмы.

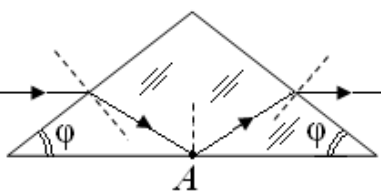


Рис. 2.17

2.56*. Сечение стеклянной призмы имеет форму равнобедренного треугольника. Определить минимальное значение преломляющего угла φ , при котором никакой луч, падающий на боковую грань, после преломления не сможет выйти из призмы через вторую боковую грань.

2.57*. На рис. 2.17 показан ход луча в равнобедренной стеклянной призме. Луч входит в призму и выходит из неё параллельно её основанию. Показать, что при любом угле φ , обеспечивающем такой проход луча, в точке A происходит его полное внутреннее отражение (такая призма называется *обращающей*).

2.58*. Можно ли что-нибудь увидеть через две смежные грани стеклянного куба, если остальные сделать матовыми?

2.59*. На столе стоит стеклянный цилиндр ($n = 1,6$) радиусом R , высотой h . На оси цилиндра на высоте H над его верхним торцом находится точечный источник света. Найти площадь тени, даваемой цилиндром на столе.

2.60*. На столе стоит цилиндр из прозрачного льда ($n = 1,31$) радиусом R , высотой $h = 2R$. На оси цилиндра на высоте $H = R/2$ над его верхним торцом находится точечный источник света. Найти площадь тени, даваемой цилиндром на столе.

2.61*. При некоторой зависимости показателя преломления воздуха от высоты над уровнем моря $n(h)$ пучок света, испущенный излучателем параллельно поверхности Земли, обогнёт Землю по окружности и вернётся в исходную точку сзади, т. е. «в затылок» излучателю. Найти эту зависимость $n(h)$. Каково в такой атмосфере должно быть распределение плотности воздуха с высотой $\rho(h)$?

2.2. Тонкие линзы

$$D = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - \text{оптическая сила тонкой линзы.}$$

$$G = \gamma / \gamma_0 = a_0 / f - \text{угловое увеличение лупы (окуляра).}$$

2.62. Построить изображение точки A , лежащей на главной оптической оси собирающей и рассеивающей линз в вариантах (а), (б) и (в), рис. 2.18.

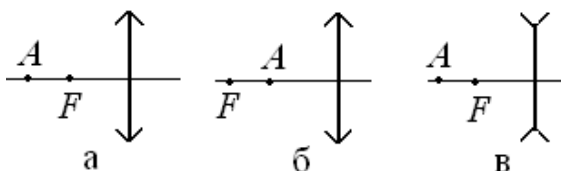


Рис. 2.18

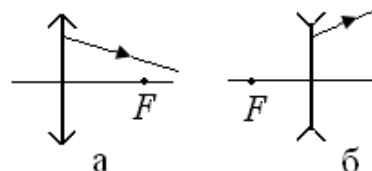


Рис. 2.19

2.63*. На рис. 2.19, а, б показаны лучи, выходящие из линз с заданными положениями фокусов. Построить лучи входящие.

2.64*. Два луча симметрично пересекают главную оптическую ось собирающей линзы на расстоянии $a = 15$ см от линзы под углом $\alpha = 4^\circ$ (рис. 2.20). Найти угол β между этими лучами после прохождения ими линзы, если фокусное расстояние линзы $f = 20$ см.

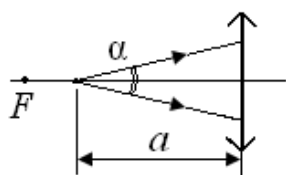


Рис. 2.20

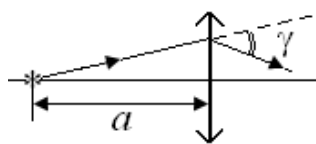


Рис. 2.21

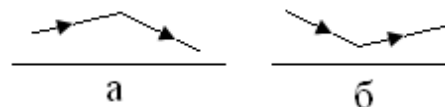


Рис. 2.22

2.65*. Точечный источник можно перемещать по главной оптической оси тонкой собирающей линзы. Угол γ отклонения луча на краю линзы зависит от расстояния a источника до линзы (рис. 2.21). При каком a угол γ максимален и чему он равен, если радиус линзы $R = 5$ мм, а ее фокусное расстояние $f = 10$ см?

2.66. На рис. 2.22, а, б задана главная оптическая ось линзы и ход одного из лучей. Построением найти положения фокусов линзы.

2.67. В каждом из вариантов линз, показанных на рис. 2.23, изображены главная оптическая ось, выходящий луч 1 и входящий луч 2. Построить дальнейший ход луча 2.

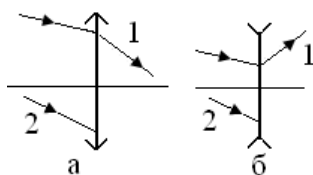


Рис. 2.23

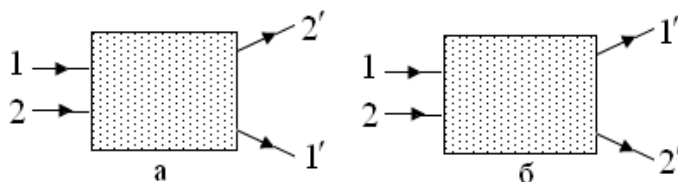


Рис. 2.24

2.68. Одна из непрозрачных ширм закрывает собирающую линзу, а другая – рассеивающую (рис. 2.24, а, б). На рисунках показаны два входных луча 1 и 2 и соответствующие выходные 1' и 2'. За какой ширмой находится собирающая линза, а за какой рассеивающая?

2.69. На рис. 2.25 (а, б, в) даны положения главной оптической оси линзы, источника s и его изображения s' . Построением найти положения оптического центра линзы и её фокусов.

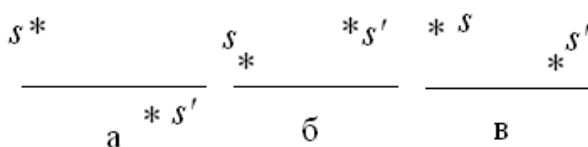


Рис. 2.25

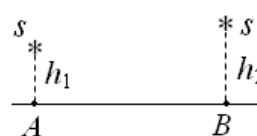


Рис. 2.26

2.70. На рис. 2.26 показаны главная оптическая ось линзы, точечный источник s и его изображение s' . Расстояния до оси: $h_1 = 2$ см, $h_2 = 3$ см соответственно, а расстояние $AB = l = 5$ см. Определить фокусное расстояние линзы.

2.71. Построением найти положение точечного источника s , если два луча от него после преломления в линзе идут, как показано на рис. 2.27

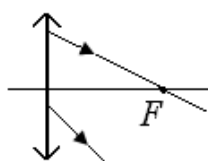


Рис. 2.27

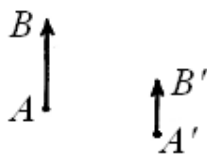


Рис. 2.28

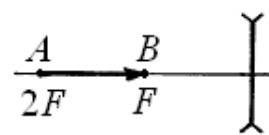


Рис. 2.29

2.72. На рис. 2.28 показаны объект AB и его изображение $A'B'$, полученное с помощью тонкой линзы. Построением найти положения линзы и её фокусов, если известно, что её главная оптическая ось горизонтальна.

2.73. Найти увеличение Γ изображения отрезка AB рассеивающей линзой (рис. 2.29).

2.74. Фокусное расстояние собирающей линзы равно f . Определить линейное увеличение Γ объекта, находящегося на расстоянии $a > f$ от линзы. Выразить Γ через a и f для рассеивающей линзы.

2.75. Фокусное расстояние линзы $f = 16$ см. На каком расстоянии a от линзы надо поместить объект, чтобы его изображение было мнимым и увеличенным в $\Gamma = 4$ раза?

2.76. Определить минимально возможное расстояние l между объектом и его действительным изображением при использовании линзы с фокусным расстоянием $f = 10$ см. Какое при этом будет увеличение объекта Γ ?

2.77. Объект находится на некотором расстоянии $a > f$ от собирающей линзы с фокусным расстоянием $f = 20$ см. Сместив объект на расстояние $\Delta x = 10$ см, получают его изображение с тем же увеличением Γ . Определить величины a и Γ .

2.78*. Объект находится на расстоянии $a_0 = 1,5 f$ от собирающей линзы (f – её фокусное расстояние). В момент $t = 0$ линза начинает приближаться к объекту со скоростью v_0 . С какой скоростью v и в какую сторону будет двигаться его изображение в этот момент?

2.79. Какое фокусное расстояние f должен иметь объектив для съёмки местности с высоты $a = 1$ км в масштабе 1:1000?

2.80. Длина кинозала 20 м. Размер экрана $4,8 \times 3,6$ м². Определить фокусное расстояние объектива кинопроектора, если размер кадра на киноплёнке 24×18 мм².

2.81. Объект находится на расстоянии nf перед рассеивающей линзой с фокусным расстоянием f . На каком расстоянии b от линзы получится изображение объекта, и каково будет его линейное увеличение Γ ?

2.82. Расстояние от объекта до экрана $l = 90$ см. На каком расстоянии b от экрана надо поместить собирающую линзу с фокусным расстоянием $f = 20$ см, чтобы на экране получилось изображение объекта?

2.83. Расстояние между объектом и его изображением, даваемым тонкой линзой, равно половине фокусного расстояния линзы. Определить линейное увеличение Γ объекта.

2.84. Проверяя очки, человек получил на полу четкое изображение нити лампы, держа их на расстоянии 1 м от пола. Какова оптическая сила стёкол очков, если лампа висит над полом на высоте 3 м?

2.85. Экран находится на расстоянии l от объекта. Два положения линзы, дающие на экране изображение объекта, разделены интервалом s . Определить фокусное расстояние f линзы.

2.86*. При перемещении линзы между объектом и экраном два её положения дают чёткое изображение объекта: в одном положении высота изображения равна h_1 , а в другом h_2 . Определить высоту объекта H .

2.87*. Если на неподвижный предмет смотреть через рассеивающую линзу, то по мере её удаления от глаза предмет выглядит всё меньше и меньше. Но затем его видимые размеры начинают увеличиваться. При каком удалении d линзы от глаза видимые размеры предмета минимальны?

2.88. Экран находится на расстоянии $l = 25$ см от объекта. Определить оптическую силу D линзы, если она даёт изображение объекта на экране, увеличенное в $\Gamma = 2$ раза.

2.89. Объект помещался поочерёдно в двух местах на главной оптической оси линзы с фокусным расстоянием $f = 50$ см, и в обоих случаях его линейное увеличение $\Gamma = 10$. Найти расстояние d между этими положениями объекта, если в обоих случаях он находился по одну сторону от линзы.

2.90. Прямое изображение, даваемое собирающей линзой, в два раза больше объекта, а расстояние между объектом и изображением 20 см. Определить фокусное расстояние линзы.

2.91. Точечный источник света находится на расстоянии $a = 30$ см от собирающей линзы на её главной оптической оси. Если его сместить на расстояние $H = 2$ см от оси, то его действительное изображение сместится от оси на расстояние $h = 10$ см. Определить фокусное расстояние линзы f .

2.92. Расстояние от объекта до линзы $a = 30$ см. При его изменении на $\Delta a = 10$ см, расстояние b от линзы до действительного изображения объекта возросло вдвое. Определить фокусное расстояние f линзы.

2.93. Луч пересекает главную оптическую ось собирающей линзы с фокусным расстоянием $f = 10$ см на расстоянии $a = 5$ см от линзы под углом $\alpha = 10^\circ$. Найти угол β между преломлённым лучом и главной осью.

2.94. На собирающую линзу диаметром D с фокусным расстоянием f падает широкий пучок света, параллельный главной оптической оси. На каком расстоянии l от линзы надо поставить экран, чтобы на нём получился световой круг диаметром d ?

2.95. Ширма имеет отверстие диаметром D , куда установлена собирающая линза, а за ширмой находится экран. Широкий пучок света, параллельный главной оптической оси, падает на линзу и, проходя её, образует на экране круг диаметром $2D$. Каким будет диаметр D_1 светового круга на экране, если расстояние от ширмы до экрана увеличить в 2 раза?

2.96. Собирающая линза установлена в круглую непрозрачную оправку радиусом $R = 3$ см. На главной оптической оси на расстоянии $a = 30$ см от линзы находится точечный источник света. По другую сторону от линзы на расстоянии $l = 80$ см от неё установлен экран. Определить радиус r светового пятна на экране, если фокусное расстояние линзы $f = 20$ см.

2.97. Рассеивающая линза с оптической силой $D = -10$ дптр установлена в непрозрачную круглую оправку радиусом $R = 5$ см. На главной оптической оси на двойном фокусном расстоянии от линзы находится точечный источник света. По другую сторону от линзы на расстоянии $s = 20$ см от неё установлен экран. Определить радиус r светового пятна на экране.

2.98*. В круглое отверстие в ширме вставлена рассеивающая линза с фокусным расстоянием $f_1 = 10$ см. На линзу падает параллельный пучок света. На некотором расстоянии l от линзы параллельно её плоскости расположен экран. При замене рассеивающей линзы на собирающую такого же диаметра с фокусным расстоянием $f_2 = 6$ см размер светлого пятна на экране не изменился. Определить расстояние l .

2.99*. На главной оптической оси собирающей линзы с фокусным расстоянием f на расстоянии a от неё помещён точечный источник света. На каком расстоянии l от линзы надо поместить экран, чтобы радиус светлого круга на нём был вдвое больше радиуса линзы?

2.100. Диаметр собирающей линзы $D = 5$ см. На главной оптической оси на расстоянии $a = 15$ см от линзы находится точечный источник света. Экран плавно отодвигают от линзы, и на расстоянии $l = 12$ см от линзы диаметр светлого круга на нем уменьшается до $d = 3$ см. Определить фокусное расстояние линзы f .

2.101. В фокусе рассеивающей линзы находится точечный источник света. Один из лучей, идущих к линзе от источника, образует малый угол α с главной оптической осью. Определить соответствующий угол β после прохождения этого луча через линзу.

2.102*. Точечный источник света находится на расстоянии l от экрана. На каком расстоянии x от источника надо поместить тонкую собирающую линзу с фокусным расстоянием $f > l/4$, чтобы радиус светлого круга на экране был наименьшим?

2.103. Расстояние между двумя точечными источниками $l = 24$ см. Где между ними надо поместить собирающую линзу с фокусным расстоянием $f = 9$ см, чтобы изображения обоих источников получились в одной точке?

2.104*. Объект находится на расстоянии $s_1 = 8$ см от переднего фокуса линзы, а его изображение на экране – на расстоянии $s_2 = 18$ см от заднего фокуса. Определить фокусное расстояние линзы f .

2.105. Построением определить диаметр D изображения Солнца, даваемого с помощью собирающей линзы с фокусным расстоянием $f = 40$ см, если угловой размер солнечного диска с Земли $\gamma = 0,53^\circ$.

2.106. Интенсивность света I – это мощность, переносимая светом через единичную площадку, перпендикулярную направлению переноса. Известно, что интенсивность солнечного излучения на Земле $I_0 = 1,4$ кВт/м², а угловой размер Солнца с Земли $\gamma = 32'$. Изображение Солнца получают с помощью собирающей линзы диаметром $D = 10$ см с фокусным расстоянием $f = 26$ см. Найти интенсивность I_ϕ солнечного света в фокусе линзы.

2.107. Объект, сфотографированный с расстояния a_1 , получился на плёнке высотой h_1 , а с расстояния a_2 – высотой h_2 . Определить фокусное расстояние f объектива.

2.108*. Собирающая линза даёт на экране изображение объекта с увеличением $\Gamma = 4$. Линзу сдвигают перпендикулярно её главной оптической оси на расстояние $h = 2$ мм. Найти смещение x изображения на экране.

2.109*. Собирающая линза с фокусным расстоянием $f = 40$ см даёт на экране чёткое изображение точечного источника, лежащего на ее главной оптической оси на расстоянии $a = 60$ см от линзы. Линзу разрезали по диаметру на две половинки и симметрично раздвинули их на $h = 2$ мм. На какое расстояние x будут раздвинуты два изображения источника ?

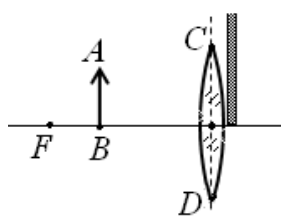


Рис. 2.30.

2.110*. Верхняя половина собирающей линзы CD закрыта непрозрачной ширмой, установленной вплотную к линзе. Построить изображение A_1B_1 предмета AB , расположенного между линзой и её передним фокусом (рис. 2.30). Показать область положения глаза, из которой через такую линзу будет видна точка A .

2.111*. Луч падает на рассеивающую линзу с фокусным расстоянием $f = 20$ см параллельно её главной оптической оси. По другую сторону линзы на расстоянии $b = 60$ см от неё находится экран. На какое расстояние x и в какую сторону сместится на экране след луча, если линзу сдвинуть перпендикулярно её оси вверх на расстояние $h = 5$ мм ?

2.112. На пути сходящегося пучка света установлена рассеивающая линза. После её прохождения лучи сходятся на главной оптической оси на расстоянии $a = 25$ см от линзы. Если линзу убрать, то точка схождения сместится на расстояние $l = 5$ см. Определить оптическую силу линзы.

2.113*. Точечный источник света лежит на главной оптической оси собирающей линзы на расстоянии $2f$ от линзы, где $f = 20$ см – фокусное расстояние линзы. На какое расстояние x и в какую сторону сместится изображение источника, если линзу повернуть на угол $\alpha = 20^\circ$.

2.114*. Точечный источник S лежит слева на расстоянии $a = 60$ см от собирающей линзы с фокусным расстоянием $f = 20$ см. Источник расположен на расстоянии $h = 8$ см от главной оптической оси. В передней фокальной плоскости линзы установлена ширма с малым

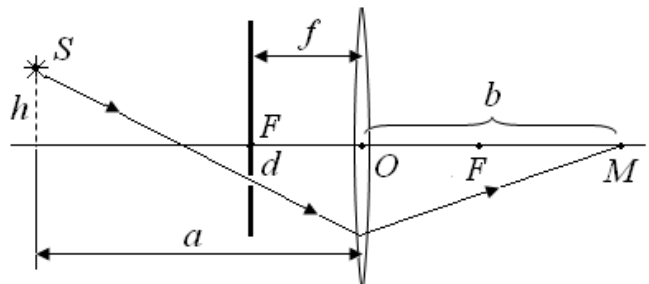


Рис. 2.31

отверстием на расстоянии $d = 4$ см от главной оптической оси, как показано на рис. 2.31. На каком расстоянии b от линзы луч от источника S , проходящий через это отверстие, пересечёт главную оптическую ось справа от линзы?

2.115. С помощью неподвижного объектива с расстояния $a = 20$ м фотографируется автомобиль, проходящий мимо со скоростью $v = 72$ км/ч. Фокусное расстояние объектива $f = 40$ мм. Каким должно быть время экспозиции τ (выдержка), чтобы «размытость» изображения на плёнке не превышала $\Delta h = 40$ мкм?

2.116*. Объектив фотоаппарата, имеющий фокусное расстояние $f = 50$ мм, сфокусирован на объект на расстоянии $a = 4$ м. Определить диаметр D диафрагмы (т. е. диаметр открытой части объектива), позволяющий дальнюю границу a_1 глубины резкости довести до ∞ , если резким считается изображение, размытость d которого на фотопленке не превышает $0,05$ мм (размытость – это диаметр изображения на пленке каждой точки объекта). Какова при этом будет ближняя граница a_2 глубин резкости?

2.117*. Если объект находится на расстоянии $a = 2$ м от линзы с фокусным расстоянием $f = 50$ мм, то на экране будет его чёткое изображение. Найти минимальное a_1 и максимальное a_2 расстояния объекта от линзы, чтобы размытость d его изображения на экране (т. е. размер изображения каждой точки объекта) не превышала $0,1$ мм. Диаметр линзы $D = 30$ мм.

2.3. Различные оптические системы

2.118. Можно ли сфотографировать мнимое изображение? Если да, то построить ход лучей в системе «объект-линза-фотоаппарат».

2.119. Две одинаковые тонкие собирающие линзы с фокусным расстоянием f расположены соосно на расстоянии f друг от друга. Предмет установлен на расстоянии a от левой линзы. Построением найти положение b изображения и его линейное увеличение Γ .

2.120. Пучок параллельных лучей, проходя через две собирающие линзы, остаётся параллельным. Расстояние между линзами $d = 15$ см. Определить фокусное расстояние f_1 первой линзы, если у второй $f_2 = 9$ см.

2.121. Две линзы – собирающая с фокусным расстоянием $f_1 = 30$ см и рассеивающая с фокусным расстоянием $f_2 = 10$ см – имеют общую главную оптическую ось. Как их следует разместить (т. е. определить их порядок и расстояние d между ними), чтобы параллельный пучок света после прохождения двух линз оставался параллельным?

2.122. Пучок лучей от бесконечно удалённого точечного источника падает на рассеивающую линзу с фокусным расстоянием $f_1 = 30$ см. На расстоянии $d = 40$ см от неё соосно установлена собирающая линза с фокусным расстоянием $f_2 = 45$ см. На каком расстоянии b от собирающей линзы и с какой стороны от неё будет изображение источника?

2.123*. Показать, что если две тонкие линзы с оптическими силами D_1 и D_2 соосно сдвинуть вплотную, то оптическая сила системы $D = D_1 + D_2$.

2.124*. Если две тонкие плоско-вогнутые линзы сложить плоскими сторонами, то они образуют линзу с фокусным расстоянием f_1 . А если их сдвинуть вогнутыми сторонами, а полость заполнить водой, то получится новая линза. Найти её фокусное расстояние f_2 . Показатели преломления стекла и воды $n_{\text{ст}} = 1,66$, $n_{\text{в}} = 1,33$.

2.125*. Тонкая линза L_1 даёт действительно изображение предмета, увеличенное в $\Gamma_1 = 2$ раза. Если на её место поставить линзу L_2 , то она даст действительно изображение, увеличенное в $\Gamma_2 = 6$ раз. Каково будет увеличение Γ , если на место линзы L_1 поставить обе, плотно сдвинутые вместе?

2.126. Две тонкие линзы – рассеивающая с фокусным расстоянием $f_1 = 30$ см и собирающая с фокусным расстоянием $f_2 = 60$ см соосно сдвинуты вплотную. На расстоянии $a = 90$ см слева от рассеивающей линзы на её оси находится точечный источник света. На каком расстоянии b от линз и с какой стороны от них будет изображение источника?

2.127*. Рассеивающая линза с фокусным расстоянием $f_1 = 5$ см установлена на расстоянии $s = 45$ см от экрана. Где между ними (на каком расстоянии b от экрана) надо поместить собирающую линзу с фокусным расстоянием $f_2 = 8$ см, чтобы на экране получилось чёткое изображение удалённого источника?

2.128*. Две собирающие линзы с фокусными расстояниями $f_1 = 12$ см и $f_2 = 15$ см установлены соосно на расстоянии $d = 36$ см. Точечный источник света находится на оси системы на расстоянии $a_1 = 48$ см от первой линзы. На каком расстоянии b_2 от второй линзы получится его изображение? Построить ход лучей в системе.

2.129*. Две тонкие собирающие линзы с фокусными расстояниями $f_1 = 10$ см и $f_2 = 20$ см установлены соосно на расстоянии $d = 50$ см. На каком расстоянии a_1 слева от первой линзы надо поместить объект, чтобы эта пара дала его прямое действительное изображение с увеличением $\Gamma = 1$?

2.130*. Две линзы – собирающая с фокусным расстоянием $f_1 = 30$ см и рассеивающая с фокусным расстоянием $f_2 = 15$ см – установлены соосно на расстоянии $d = 20$ см. Определить положение точечного источника света, обеспечивающее на выходе системы параллельный пучок лучей. Построить ход лучей в системе.

2.131*. Две одинаковые собирающие линзы с фокусными расстояниями $f = 30$ см установлены соосно на расстоянии $d = 15$ см. Определить возможные расстояния a предмета от первой линзы, при которых система даёт его действительное изображение.

2.132*. Две одинаковые собирающие линзы с фокусными расстояниями f установлены соосно на расстоянии $f/2$ друг от друга. Определить возможные расстояния a_1 предмета от первой линзы, при которых система даёт его мнимое изображение.

2.133. Человек переводит взгляд от книги, находящейся на расстоянии $a = 20$ см, на удалённый предмет. На сколько диоптрий ΔD при этом изменяется оптическая сила глаза?

2.134*. Близорукий человек может чётко видеть предметы с максимального расстояния $b = 20$ см. Какова оптическая сила D очков, необходимых ему для чёткого видения удалённых предметов?

2.135*. Дальзоркий человек может чётко видеть предметы с минимального расстояния $b = 1$ м. Какова оптическая сила D очков, необходимых ему для чтения с расстояния $a = 25$ см?

2.136*. Ближний и дальний пределы аккомодации глаза близорукого человека $b_1 = 10$ см, $b_2 = 25$ см. Определить оптическую силу D очков, необходимых человеку для чёткого видения далёких предметов. На каком минимальном расстоянии a_1 он будет чётко видеть предметы в таких очках?

2.137*. Смещением линзы объектива фотоаппарат можно настраивать на дальность от 1 м до бесконечности. В каких пределах (a_1 , a_2) будет действовать настройка, если на объектив установить насадочную линзу с оптической силой $D = +3$ дптр?

2.138*. Определить угловое увеличение Γ короткофокусного окуляра (лупы) с фокусным расстоянием $f_{\text{ок}} = 25$ мм.

Замечание. При рассмотрении объекта через окуляр глаз максимально приближен к окуляру, а сам объект располагается на расстоянии, чуть меньшем фокусного. Угловым увеличением Γ окуляра называется отношение угловых размеров γ объекта, видимого через этот окуляр, к угловым размерам γ_0 того же объекта, наблюдаемого невооруженным глазом с расстояния наилучшего зрения $a_0 = 25$ см: $\Gamma = \gamma/\gamma_0$.

2.139*. На каком расстоянии b от экрана надо держать лупу с 8-кратным увеличением, чтобы сфокусировать на нём солнечные лучи, т. е. чтобы получить на экране изображение Солнца?

2.140*. В телескоп с фокусным расстоянием объектива $f = 50$ см наблюдают Луну (бесконечно удаленный объект). Окуляр телескопа имеет фокусное расстояние $f_{\text{ок}} = 2$ см. Определить угловое увеличение Γ диска Луны таким телескопом.

2.141*. Телескоп настроен для наблюдения очень удаленных предметов. Его объектив имеет фокусное расстояние $f = 50$ см. В какую сторону и на какое расстояние x надо передвинуть окуляр, чтобы наблюдать предмет на расстоянии $a = 25$ м от объектива?

2.142*. Из телескопа с фокусным расстоянием объектива $f = 3$ м вытащили окуляр, а изображение Луны в фокальной плоскости объектива рассматривают невооруженным глазом с расстояния наилучшего зрения $a_0 = 25$ см. Каким будет угловое увеличение Γ Луны в этом случае?

2.143*. Фокусное расстояние объектива телескопа равно f . Во сколько раз изменится угловое увеличение Γ телескопа при наблюдении объектов, удаленных от него на конечное расстояние a ?

2.144. Ни одна звезда в небе (кроме Солнца) даже в самый сильный телескоп не видна в виде диска, а только как светящиеся точки. Что же тогда увеличивает телескоп? Каково его назначение?

2.145*. Фокусное расстояние объектива микроскопа $f = 3$ мм, а окуляра $f_{\text{ок}} = 50$ мм. Рассматриваемая в микроскоп инфузория находится на расстоянии $a = 3,1$ мм от объектива. Определить её увеличение Γ .

Замечание. Увеличением микроскопа Γ , как и в случае лупы, называется отношение угловых размеров γ объекта, видимого через микроскоп, к угловым размерам γ_0 того же объекта, наблюдаемого невооруженным глазом с расстояния наилучшего зрения $a_0 = 25$ см: $\Gamma = \gamma/\gamma_0$.

2.146. Фокусное расстояние собирающей линзы $f = 30$ см. Точечный источник расположен на расстоянии $2f$ от линзы на ее оси. На каком расстоянии s от линзы надо установить плоское зеркало, чтобы отражённые от него лучи, снова пройдя через линзу, образовывали параллельный пучок?

2.147*. На фокусном расстоянии f за собирающей линзой расположено плоское зеркало. Объект находится на расстоянии a от линзы. На каком расстоянии l от линзы и с какой стороны будет его изображение?

2.148*. На расстоянии $f/2$ за собирающей линзой с фокусным расстоянием $f = 30$ см расположено плоское зеркало. На каком расстоянии l от линзы и с какой стороны от неё находится изображение объекта, расположенного перед линзой на расстоянии $a = 15$ см от неё?

2.149*. Тонкая линза с фокусным расстоянием $f = 30$ см вплотную прилегает к плоскому зеркалу. На расстоянии $a = 20$ см перед линзой помещён предмет. Найти положение b его изображения и линейное увеличение Γ .

2.150*. Плоскую поверхность плоско-вогнутой линзы с фокусным расстоянием f посеребрили. Определить, на каком расстоянии b от линзы и с какой стороны от неё лежит изображение очень далёкого источника.

2.151*. Плоскую поверхность плоско-вогнутой линзы с фокусным расстоянием f посеребрили. На расстоянии a перед ней помещён предмет. Найти положение b его изображения и линейное увеличение $\Gamma = h'/h$.

2.152*. Тонкая линза с фокусным расстоянием $f = 30$ см создаёт изображение помещённого перед ней объекта с некоторым увеличением Γ . Если за линзой вплотную к ней придвинуть плоское зеркало, то при том же положении объекта система будет давать такое же его увеличение $\Gamma' = \Gamma$.

Найти расстояние a от линзы до объекта и его увеличение Γ .

2.153*. Краба, находящегося на глубине $d = 2$ м, фотографируют с высоты $l = 1$ м над уровнем воды. Какую дальность a надо установить на шкале объектива, если его фокусное расстояние $f = 50$ мм? Каков будет размер h изображения, если размер краба $H = 10$ см? Показатель преломления воды $n = 1,33$.

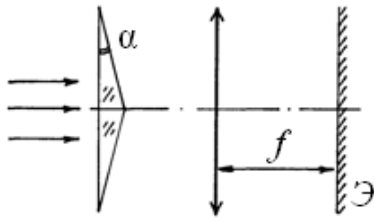


Рис. 2.32

2.154*. Стекланный конус с показателем преломления $n = 1,6$ имеет малый угол $\alpha = 5,7^\circ$ между образующей и основанием. На основание конуса падает нормально пучок света (рис. 2.32). Соосно с конусом на небольшом расстоянии от него установлена собирающая линза с фокусным расстоянием $f = 20$ см, а за ней, в её фокальной плоскости – экран. Определить вид и размер изображения на экране.

2.155*. Два одинаковых сферических аквариума радиусом R сдвинуты вплотную. Аквариумы заполнены водой с показателем преломления $n = 4/3$. В центре одного аквариума находится жук размером h , а в центре второго – рыбка. На каком расстоянии s , с точки зрения рыбки, находится от неё жук и какой величины H он ей кажется?

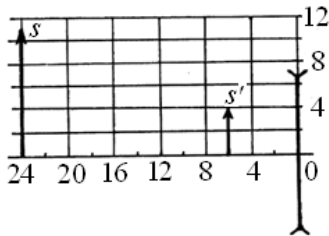


Рис. 2.33

2.156*. На рис. 2.33 показаны объект s и его изображение s' , даваемое тонкой стеклянной рассеивающей линзой. Полупространство с одной стороны от линзы заполнено жидкостью, а с другой – воздух. Сетка рисунка размечена в сантиметрах. По рисунку установить, с какой стороны от линзы находится жидкость, и определить показатель преломления этой жидкости.

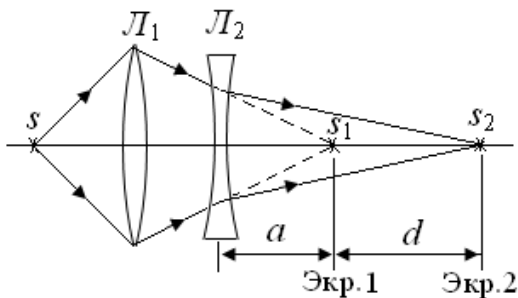


Рис. 2.34

2.157. Рассеивающая линза даёт только мнимое изображение, которое нельзя получить на экране, а значит нельзя непосредственно применить формулу тонкой линзы для определения её фокусного расстояния f . Один из методов определения фокусного расстояния рассеивающей линзы состоит в следующем.

Слева от некоторой собирающей линзы L_1 на её оси устанавливается точечный источник света s , а справа от неё – подвижный экран «Экр.1», положение которого подбирается таким, чтобы на нём получалось чёткое действительное изображение s_1 этого источника. Если теперь между собирающей линзой и экраном на расстоянии a от экрана поместить рассеивающую линзу L_2 , то для восстановления чёткого изображения источника экран надо сдвинуть вправо на расстояние d (рис. 2.34). По двум измеряемым расстояниям a и d и определяется фокусное расстояние f рассеивающей линзы. Получить соответствующую формулу.

2.4. Фотометрия

1. Световой поток Φ [Вт] – это мощность светового излучения.

2. Интенсивность света I – это световой поток, проходящий через единичную площадку, перпендикулярную направлению переноса энергии светом: $I = \Delta\Phi/\Delta S$ [Вт/м²].

Или можно так: интенсивность $I = \frac{\Delta W}{\Delta t \Delta S} = \frac{\Delta P}{\Delta S} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ – это энергия излучения, проходящая за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению переноса энергии.

3. Интенсивность света от точечного источника

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right],$$

где P – мощность источника, т. е. энергия, излучаемая им за единицу времени по всем направлениям, r – расстояние до источника.

4. Освещённость E – это отношение светового потока (мощности), падающего на поверхность, к единице её площади: $E = \Delta\Phi/\Delta S$ [Вт/м² = люкс].

5. Освещённость участка поверхности от точечного источника

$$E = \frac{P}{4\pi r^2} \cos \alpha,$$

где P – мощность источника, r – расстояние до него от участка поверхности, α – угол падения света на этот участок.

2.158. Две лампы мощностью $P_1 = 25$ Вт и $P_2 = 100$ Вт находятся на расстоянии $l = 9$ м друг от друга. Где между ними надо поместить экран, перпендикулярный линии этих ламп, чтобы его освещённость с двух сторон была одинаковой?

2.159. В зале на высоте $h = 4$ м висит лампа. И пусть точка A – вертикальная проекция лампы на пол. Во сколько раз изменится освещённость пола в точке A , если на расстоянии $d = 1,5$ м от лампы на стену повесить большое вертикальное плоское зеркало?

2.160. На какой высоте над центром круглого стола радиусом R надо поместить лампу, чтобы на краю стола получить наибольшую освещённость?

2.161*. Над серединой круглого стола радиусом $R = 1$ м на высоте $h_1 = 1$ м висит лампа мощностью $P_1 = 100$ Вт. Её заменили другой лампой мощностью $P_2 = 25$ Вт, опустив её ниже так, что освещённость центра стола осталась прежней. Как изменится освещённость края стола?

2.162*. Две лампы мощностью $P_1 = 25$ Вт и $P_2 = 200$ Вт находятся на расстоянии $l = 5$ м друг от друга и обе висят на высоте $h = 2$ м над полом. В какой точке маленький предмет на полу не будет давать тени, т. е. освещённость пола от обеих ламп будет одинаковой? При каких h задача решения не имеет, т. е. таких точек на полу нет?

2.163. На высоте h над столом находится точечный источник света (лампа). Во сколько раз увеличится освещённость стола под лампой, если на расстоянии $x = h/2$ над ней установить плоское зеркало, параллельное столу?

2.164*. На расстоянии $l = 50$ см от экрана находится точечный источник света. Между экраном и источником поместили собирающую линзу с фокусным расстоянием $f = 45$ см, так что источник оказался в ее фокусе. Освещённость в центре экрана при этом не изменилась. Сколько процентов световой энергии теряется в линзе?

2.165*. Точечный источник света, равномерно излучающий во все стороны, расположен на расстоянии 3 м от плоского зеркала. С другой стороны от источника на расстоянии 1 м от него находится экран. На сколько процентов изменится освещённость в центре экрана, если на расстоянии 1 м от зеркала поместить собирающую линзу с оптической силой $D = 1$ дптр?

2.166*. Угловой размер Солнца $\gamma = 0,5^\circ$. Перпендикулярно лучам Солнца ставят ширму с круглым отверстием диаметром $d = 1$ см. На каком расстоянии h от ширмы надо установить экран, чтобы в его центре освещённость была бы в четыре раза меньше, чем освещённость, даваемая полностью открытым Солнцем?

2.167*. Сравнить солнечную энергию, падающую летом на единицу поверхности Земли на полюсе и на экваторе. Угол наклона земной оси к нормали её орбиты вокруг Солнца $\varphi = 23^\circ$.

Раздел 3. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

3.1. Монохроматичность света

$\Delta\omega = 2\pi/\tau$ – спектральная ширина оптического импульса длительностью τ .

$m = \omega/\Delta\omega = \lambda/\Delta\lambda$ – степень монохроматичности излучения, где $\lambda = 2\pi c/\omega$.

$\tau = \frac{\lambda^2}{c\Delta\lambda}$, где τ – длительности импульса, $\Delta\lambda$ – ширина спектральной линии.

$l_{\text{ког}} = c\tau = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$ – длина когерентности оптического импульса.

$N = \frac{\tau}{T} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = m$ – число колебаний в радиоимпульсе.

3.1. Найти максимальную толщину h (мм) мыльной плёнки ($n = 1.3$), дающей интерференционную картину в отражённом свете с длиной волны $\lambda = 520$ нм и степенью монохроматичности $m = 100$.

3.2. Линия с длиной волны $\lambda = 600$ нм имеет спектральную ширину $\Delta\lambda = 0,6$ нм. Найти длину когерентности $l_{\text{ког}}$ (мм) этого излучения и длительность цуга τ (пс). Сколько периодов колебаний N содержит такой цуг?

3.3. Цуг света с длиной волны $\lambda = 600$ нм имеет длительность $\tau = 20$ пс. Найти спектральную ширину $\Delta\lambda$ (нм) этого цуга. Сколько периодов колебаний N содержит этот цуг?

3.4. Фильтр вырезает из белого света зелёную линию $\lambda = 500$ нм шириной $\Delta\lambda = 0,5$ нм. При какой разности хода Δ двух лучей ещё можно наблюдать интерференцию в этом свете?

3.5. Лазер, работающий на длине волны $\lambda = 600$ нм, излучает импульсы длительностью $\tau = 2$ пс. Определить их спектральную ширину $\Delta\lambda$ и степень монохроматичности m .

3.6. Луч света проходит между зубцами вращающегося колеса, отражается от зеркала, установленного на расстоянии $l = 8,7$ км, и возвращается к наблюдателю, опять проходя между зубцами того же колеса (опыт Физо по определению скорости света). При какой минимальной частоте ν вращения колеса отражённый луч не будет виден наблюдателю, если число зубцов в колесе $N = 720$?

3.7*. На чёрной стене наклеен прямоугольный лист белой бумаги. Как будут окрашены верхний и нижний края этого листа, если на него смотреть сквозь призму, обращённую преломляющим ребром вверх?

3.8*. Луч белого света падает нормально на поверхность призмы с малым преломляющим углом $\varphi = 5,7^\circ$ и разлагается в спектр. Какова минимальная ширина h спектра на экране, установленном на расстоянии $l = 2$ м от призмы, если показатель преломления стекла для красного цвета $n_{кр} = 1,58$, а для фиолетового $n_{ф} = 1,63$?

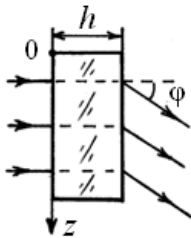


Рис. 3.1

3.9*. Плоско-параллельная пластинка толщиной h имеет показатель преломления n , линейно растущий по закону $n = n_0(1 + kz)$, где k – известный коэффициент. На пластинку слева падает нормально параллельный пучок монохроматического света (рис. 3.1). Определить угол φ отклонения выходного пучка.

3.2. Интерференция

3.2.1. Схема Юнга

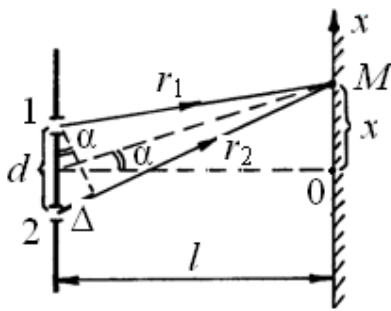


Рис. 3.2

$\Delta = k\lambda$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) – условие максимума освещённости в точке M на экране (рис. 3.2);

$\Delta = (2k + 1)\lambda/2$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) – условие минимума освещённости в точке M , где $\Delta = r_2 - r_1$ – разность хода двух лучей от источника до точки M , λ – длина волны. Если для лучей 2 и 1 среды различны, то их разность хода $\Delta = n_2 r_2 - n_1 r_1$, где n_2 и n_1 – показатели преломления соответствующих сред.

$x_k^{\max} = \frac{l}{d} k\lambda$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) – положения максимумов освещённости на экране;

$x_k^{\min} = \frac{l}{d} (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) – положения минимумов освещённости;

$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda$ – расстояние между максимумами освещённости на экране;

$\Delta < l_{\text{ког}}$ – условие наблюдения интерференционной картины на экране.

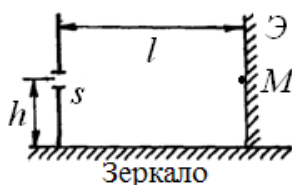


Рис. 3.3

3.10. Точечный источник s монохроматического света ($\lambda = 500$ нм) находится на высоте $h = 1$ мм над плоским зеркалом (рис. 3.3). На расстоянии $l = 1$ м от источника перпендикулярно зеркалу установлен экран. Каково расстояние Δx между светлыми интерференционными полосами на экране? Тёмная или светлая полоса будет на экране в точке M на той же высоте h над зеркалом вследствие интерференции света от источника и его изображения в зеркале?

3.11*. На ширму III с двумя узкими параллельными щелями падает нормально плоская монохроматическая волна. На расстоянии $s = 3$ м от плоскости щелей установлен экран \mathcal{E} , как показано на рис.

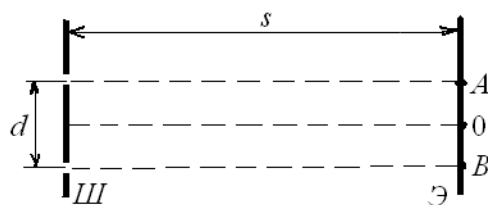


Рис. 3.4

3.4. В точках A , O и B экрана наблюдаются три соседние светлые интерференционные полосы. На какие минимальные расстояния Δs_1 и Δs_2 надо удалить или приблизить экран, чтобы в точках A и B оказались тёмные полосы?

3.12. На рис. 3.5 показана схема интерферометра для измерения показателя преломления газов. Здесь p – точечный источник света ($\lambda = 600$ нм), 1 и 2 – две одинаковые трубки с воздухом длиной $l = 10$ см, III –

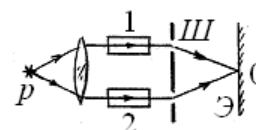


Рис. 3.5

ширма с двумя щелями. Когда воздух в трубке 1 заменили метаном, то картина на экране \mathcal{E} сместилась вверх на $N = 25$ полос. Определить показатель преломления метана $n_{\text{мет}}$, если $n_{\text{возд}} = 1,00029$.

3.13*. Схема интерферометра та же, что и в предыдущей задаче. Когда воздух в трубке 1 заменили водородом, то картина на экране \mathcal{E} сместилась вниз на $N = 25$ полос. Определить показатель преломления водорода $n_{\text{вод}}$, если $n_{\text{возд}} = 1,00029$.

3.14*. Плоская монохроматическая волна падает нормально на горизонтальную ширму с двумя узкими щелями на расстоянии $d = 2,5$ мм друг от друга. На экране, установленном под ширмой на расстоянии $l = 1$ м, образуется система интерференционных полос. На какое расстояние s и в какую сторону сместятся эти полосы, если одну из щелей, например, правую, перекрыть стеклянной плёнкой ($n = 1,5$) толщиной $h = 0,01$ мм?

3.15*. Собирающую линзу с фокусным расстоянием $f = 10$ см разрезали по диаметру на две половинки и симметрично раздвинули их на $h = 0,5$ мм, заполнив промежуток непрозрачным веществом. Перед линзой на расстоянии $a = 15$ см находится точечный источник монохроматического света длиной волны $\lambda = 500$ нм. Оценить число N светлых интерференционных полос на экране, расположенном за линзой на расстоянии $L = 60$ см.

Замечание. Воспользоваться результатом задачи **2.109**.

3.16. На ширму с двумя очень узкими параллельными щелями падает нормально широкий пучок света, прошедший через светофильтр с границами пропускания $550 < \lambda < 600$ нм. Оценить число N видимых светлых интерференционных полос на экране, установленном за ширмой.

3.2.2. Тонкие плёнки

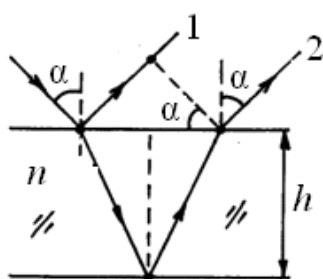


Рис. 3.6

$\Delta = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \lambda/2$ – разность хода двух лучей, отражённых от передней и задней поверхностей плёнки, где h – толщина плёнки, α – угол падения луча, n – показатель преломления вещества плёнки (рис. 3.6); добавка « $\lambda/2$ » – это «потеря полуволны», связанная с тем, что при отражении луча от оптически более плотной среды фаза волны меняется на π .

3.17*. Для уменьшения отражения света от поверхности линзы в на неё наносят прозрачную плёнку с показателем преломления $n \approx 1,3 < n_{\text{стекла}}$ (просветление оптики). Определить толщину h такой плёнки, необходимой для «погашения» отражённого света длиной волны $\lambda = 520$ нм, падающего на поверхность линзы нормально.

3.18*. В результате нормального освещения мыльной пленки монохроматическим светом с различными длинами волн выяснилось, что максимум отражения приходится на длину волны $\lambda_1 = 630$ нм, а ближайший к нему минимум – на длину $\lambda_2 = 525$ нм. Какова толщина h пленки, если показатель преломления раствора мыла $n = 1,33$?

3.19*. Луч белого света падает наклонно на прозрачную пленку. При этом максимум отражения наблюдается для зеленого цвета. В какую сторону спектра (к синему или к красному) сместится максимум отражения при небольшом уменьшении угла падения луча?

3.20. Мыльная плёнка ($n = 1,3$) освещается пучком белого света, падающим под углом $\alpha = 30^\circ$. Спектральный анализ отражённого света показал, что максимальную интенсивность имеют линии: красная ($\lambda_k = 750$ нм) и синяя ($\lambda_c = 450$ нм). Определить минимально возможную толщину плёнки h (нм).

3.21. Мыльная плёнка ($n = 1,3$) освещается пучком белого света, падающим под углом $\alpha = 30^\circ$. Анализ отражённого света показал, что максимальную яркость имеет фиолетовая линия ($\lambda_f = 400$ нм), а жёлтая линия ($\lambda_{\text{ж}} = 600$ нм) не отражается совсем. Определить минимально возможную толщину плёнки h .

3.2.3. Кольца Ньютона

$r_k^{\text{тём}} = \sqrt{Rk\lambda}$ ($k = 0, 1, \dots$) – радиус k -го тёмного кольца в отражённом свете,

$r_k^{\text{св}} = \sqrt{R\lambda(k + 1/2)}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) – радиус k -го светлого кольца,

R – радиус кривизны плоско-выпуклой линзы, λ – длина волны.

3.22. Расстояние между вторым и третьим тёмными кольцами Ньютона в отражённом свете $\Delta r_{23} = 1$ мм. Определить Δr_{56} .

3.23*. Плосковыпуклая линза с радиусом кривизны R_1 выпуклой поверхности положена этой поверхностью на вогнутую сферическую поверхность радиусом $R_2 > R_1$ рассеивающей линзы, так что между ними образуется узкий воздушный слой. На плоскую поверхность первой линзы сверху нормально падает параллельный пучок света длиной волны λ . Определить радиус k -го тёмного кольца Ньютона в отражённом свете.

3.24. В установке для наблюдения колец Ньютона пространство между линзой и плоским зеркалом заполнено жидкостью. Радиус пятого тёмного кольца $r_5^{\text{тём}} = 2$ мм. Определить показатель преломления n жидкости, если радиус кривизны линзы $R = 2$ м, а длина волны $\lambda = 520$ нм.

3.25*. Плосковыпуклая линза с радиусом кривизны выпуклой поверхности $R = 1$ м лежит этой поверхностью на плоской стеклянной пластине. На плоскую поверхность линзы сверху падает нормально пучок света, прошедший через светофильтр с границами пропускания $550 < \lambda < 600$ нм. Оценить число N видимых темных (или светлых) колец Ньютона в отражённом свете.

3.26. Плоско-выпуклая линза лежит сферической поверхностью радиусом кривизны $R = 40$ см на стеклянной пластинке. Нормально падающий на линзу свет со средней длиной волны $\lambda = 640$ нм и степенью монохроматичности $m = \lambda/\Delta\lambda = 1000$ при отражении от сферической поверхности линзы и пластинки создаёт интерференционную картину в виде колец (колец Ньютона). На каком расстоянии r от центральной точки интерференционная картина исчезает из-за немонохроматичности света?

3.3. Дифракция

3.3.1. Дифракция Френеля и дифракция Фраунгофера

$\rho_k = \sqrt{\frac{Rr_0}{R+r_0}} k\lambda$ ($k = 1, 2, \dots$) – радиус k -той зоны Френеля, где R – расстояние от точечного источника до круглого диаметром D отверстия в ширме, r_0 – расстояние от ширмы до экрана. Для удалённого источника $\rho_k = \sqrt{r_0 k\lambda}$.

Если число зон k , видимых с осевой точки M экрана в сечении отверстия чётное, то в точке M будет тёмное пятно, а если k – нечётное, то светлое.

Если в отверстии ширмы укладывается более одной зоны Френеля, т.е. соотношение между R , r_0 , D и λ таково, что $D/2 > \rho_1 = \sqrt{\frac{Rr_0}{R+r_0}} \lambda$, то дифракция носит название *дифракции Френеля*. В зависимости от того, на сколько $D/2 > \rho_1$, пятно в точке M может быть как тёмным (если k – чётное), так и светлым (если k – нечётное). Если же в отверстии ширмы укладывается не более одной зоны Френеля, т.е. соотношение между R , r_0 , D и λ таково, что $D/2 \leq \rho_1$, то дифракция носит название *дифракции Фраунгофера*. При $D/2 \leq \rho_1$ пятно в точке M всегда будет светлым.

3.27. Жёлтый свет ($\lambda = 600$ нм) падает нормально на ширму с круглой диафрагмой диаметром $D = 6$ мм. За ширмой на расстоянии $r_0 = 3$ м находится экран. Определить: а) сколько зон Френеля укладывается в отверстии диафрагмы; б) светлым или тёмным будет центр дифракционной картины.

3.28. Расстояние между точечным источником ($\lambda = 500$ нм) и экраном $l = 2$ м. Посередине между ними находится ширма с круглым отверстием. Определить диаметр отверстия D , открывающий лишь первую зону Френеля. Какова при этом будет освещённость в центре дифракционной картины, если освещённость на экране без ширмы равна I_0 ?

3.29. Расстояние между точечным источником ($\lambda = 500$ нм) и экраном $l = 1$ м. Посередине между ними находится ширма с круглым отверстием. Определить минимальный отличный от нуля диаметр отверстия D , чтобы центр дифракционной картины был тёмным.

3.30. В чёрном листе бумаги сделали прокол иглой диаметром $D = 1$ мм. На это отверстие падает нормально оранжевый свет ($\lambda = 625$ нм). Какой вид дифракции (Френеля или Фраунгофера) будет наблюдаться на экране, установленном от отверстия на расстоянии: а) $r_0 = 13$ см; б) $r_0 = 20$ см; в) $r_0 = 80$ см? Светлым или тёмным будет центр дифракционной картины в каждом варианте?

3.31. Расстояние между точечным источником ($\lambda = 500$ нм) и экраном $l = 1$ м. Между ними помещается ширма с круглым отверстием радиусом $\rho = 1$ мм. На каком расстоянии r от экрана надо поместить эту ширму, чтобы в её отверстии укладывалось наименьшее число k зон Френеля, и чему равно это k ?

3.32. Расстояние между точечным источником ($\lambda = 500$ нм) и экраном $l = 1$ м. Между ними помещается ширма с круглым отверстием радиусом $\rho = 0,3$ мм. На каком расстоянии r от экрана надо поместить эту ширму, чтобы в её отверстии укладывалось $k = 2$ зоны Френеля?

3.3.2. Дифракционная решётка

Угловое положение главных максимумов определяется формулой:

$$b \sin \alpha_k = \pm k\lambda, \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

где b – период решётки, λ – длина волны; k – порядок максимума.

$n = 1/b$ – плотность штрихов.

$D = d\alpha/d\lambda$ – угловая дисперсия решётки, где $d\alpha$ – угловое смещение максимума при изменении длины волны на $d\lambda$. При нормальном падении света на решётку $D = k/b = kn$, где k – порядок максимума (обычно $k = 1$).

$R = \lambda/\Delta\lambda$ – разрешающая сила (разрешение) решётки, где $\Delta\lambda$ – минимальная разность длин волн двух спектральных линий вблизи λ , при которой эти линии на экране воспринимаются отдельно. При нормальном падении света на решётку $R = kN$, где k – порядок максимума (обычно $k = 1$).

3.33. Определить наибольший порядок максимума k_{\max} для жёлтой линии ($\lambda = 600$ нм), который может дать дифракционная решётка с плотностью штрихов $n = 500$ мм⁻¹. Под какими углами α_k (град) будут наблюдаться все возможные максимумы?

3.34. На дифракционную решётку с плотностью штрихов $n = 1000$ мм⁻¹ падает нормально пучок белого света. Определить наибольший порядок k_{\max} полного видимого спектра ($400 < \lambda < 760$ нм), который дает такая решётка. Под какими углами будут наблюдаться границы этого спектра?

3.35. Доказать, что никакая решётка при освещении её белым светом ($400 \leq \lambda \leq 760$ нм) не даст полного чистого спектра порядка выше первого.

3.36*. На дифракционную решётку с плотностью штрихов $n = 500$ мм⁻¹ падает нормально пучок света, прошедший через светофильтр с границами пропускания $500 < \lambda < 600$ нм. В каких порядках ($k, k + 1$) начнётся перекрывание спектров?

3.37. Плотность штрихов дифракционной решётки $n = 500 \text{ мм}^{-1}$. Определить: а) ширину Δx (мм) видимого спектра ($400 \leq \lambda \leq 760 \text{ нм}$) 1-го порядка на экране, получаемого с помощью линзы с фокусным расстоянием $f = 1 \text{ м}$; б) углы наблюдения α_1 и α_2 (град) границ этого спектра.

3.38. На дифракционную решётку падает нормально пучок монохроматического света. Линию 1-го порядка решётка даёт под углом $\alpha_1 = 10^\circ$. Под каким углом α_{max} решётка даст линию наибольшего порядка?

3.39. Ширина дифракционной решётки $L = 6 \text{ см}$. Каким должен быть её период b , чтобы в первом порядке было разрешено раздвоение $\Delta\lambda = 8 \text{ нм}$ (вследствие эффекта Доплера) линии $\lambda = 590 \text{ нм}$ от краёв диска Солнца? При каком угле при этом будет видно это раздвоение?

3.40. Рассчитать наименьшую ширину L (см) дифракционной решётки и её период b , чтобы она смогла разрешить в первом порядке под углом $\alpha = 30^\circ$ раздвоение $\Delta\lambda = 8 \text{ нм}$ (вследствие эффекта Доплера) линии $\lambda = 590 \text{ нм}$ от краёв диска Солнца. При какой ширине L_1 решётка не сможет разрешить это раздвоение ни в каких углах α ?

3.41. Определить угловую дисперсию D (град/нм) решётки для угла дифракции $\alpha = 45^\circ$ и длины волны $\lambda = 500 \text{ нм}$.

3.3.3. Угловое разрешение объектива

$\gamma = \lambda/D$ – угловое разрешение объектива диаметром D на длине волны λ .

3.42. Найти угловое разрешение объектива диаметром $D = 10 \text{ см}$ на волне $\lambda = 500 \text{ нм}$. Ответ выразить в угловых секундах.

3.43. Расстояние до Луны $l = 400 \text{ тыс. км}$. Оценить теоретически минимальные размеры предметов, различимых на Луне объективами диаметром $D_1 = 5 \text{ см}$ (бинокль) и $D_2 = 5 \text{ м}$ (телескоп).

3.44. Антенна радиолокатора имеет диаметр $D = 3 \text{ м}$, а рабочая длина волны $\lambda = 3 \text{ см}$ (частота 10 ГГц). Найти угловое разрешение данной антенны. С какого расстояния l такой радиолокатор «увидит» два самолёта в группе именно как два, если расстояние между ними $s = 100 \text{ м}$.

3.45. Диаметр зрачка глаза человека $D = 2 \text{ мм}$. На белом экране нарисованы две жирные чёрные точки отделённые промежутком $s = 5 \text{ мм}$. Оценить, с какого расстояния l человек теоретически сможет различить их именно как две. Принять $\lambda = 600 \text{ нм}$.

3.3.4. Принцип Гюйгенса-Френеля

3.46*. Плоская световая волна падает параллельным пучком на экран Э. Перед экраном помещена непрозрачная полубесконечная пластина П (рис. 3.7). Как изменится освещённость экрана в точке М, лежащей напротив края пластины?

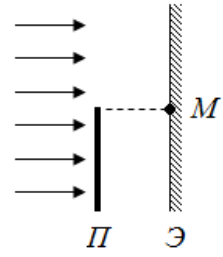


Рис. 3.7

3.4. Поляризация

3.47. Найти угол Брюстера $\alpha_{\text{Бр}}$ при отражении света от прозрачной жидкости, если угол полного внутреннего отражения для неё $\beta_0 = 49^\circ$.

3.48. Найти угол Брюстера $\alpha_{\text{Бр}}$ при отражении света от диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3$.

3.49. Для воды угол полного внутреннего отражения $\beta_0 = 49^\circ$. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы отражённый от водной глади свет был полностью поляризован?

3.50. После прохождения системы из двух поляроидов интенсивность естественного света ослабляется в 8 раз. Найти угол между плоскостями пропускания этих поляроидов.

3.51. Во сколько раз ослабляется интенсивность естественного света после прохождения им системы из трёх поляроидов, в которой углы между плоскостью пропускания среднего поляроида и двух крайних равны по 45° ?

3.52*. Луч естественного света проходит через газ из оптически изотропных молекул. Найти степень поляризации p света, рассеянного под углом α к лучу.

3.53*. На поляризатор падает частично поляризованный свет с заданной интенсивностью I_0 и степенью поляризации p . Плоскость поляризации P повернута относительно оси x , вдоль которой $E = E_{0x} = E_{\text{max}}$, на угол φ (рис. 3.8). Найти интенсивность I прошедшего света.

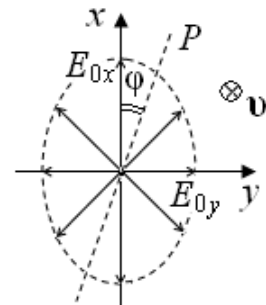


Рис. 3.8. Частично поляризованный свет

3.54*. На пути частично поляризованного света поместили поляризатор. При повороте поляризатора на угол $\varphi = 60^\circ$ от положения максимума пропускания интенсивность прошедшего света уменьшилась в 3 раза. Найти степень поляризации p падающего света.

3.5. Эффект Доплера

3.5.1. Эффект Доплера для звуковых волн

Пусть: f – частота испускания (в системе источника),

f' – частота восприятия приёмником,

$v_{\text{и}}$ – скорость источника, $v_{\text{пр}}$ – скорость приёмника,

c – скорость звука;

(ось x везде направлена от источника к приёмнику). Тогда:

$$1) v_{\text{и}} \neq 0, v_{\text{пр}} = 0. \quad f' = f \frac{c}{c \mp v_{\text{и}}} \quad (\text{«-» – приближается, «+» – удаляется}).$$

$$2) v_{\text{и}} = 0, v_{\text{пр}} \neq 0. \quad f' = f \frac{c \mp v_{\text{пр}}}{c} \quad (\text{«-» – удаляется, «+» – приближается}).$$

$$3) v_{\text{и}} \neq 0, v_{\text{пр}} \neq 0. \quad f' = f \frac{c - v_{\text{пр}}}{c - v_{\text{и}}} \quad (v_{\text{и}} \text{ и } v_{\text{пр}} - x\text{-компоненты скоростей, } x_{\text{и}} < x_{\text{пр}}).$$

Если источник и приёмник движутся под углами α и β к соединяющей их линии, т. е. к оси x , причём $x_{\text{и}} < x_{\text{пр}}$, то в формуле (3) вместо $v_{\text{и}}$ и $v_{\text{пр}}$ надо ставить их проекции (со знаком) на ось x , т. е. $v_{\text{и}} \cos \alpha$ и $v_{\text{пр}} \cos \beta$. Отсюда следует, что *поперечный эффект Доплера* для звуковых волн отсутствует: при $v_{\text{пр}} = 0$, $v_{\text{и}} \neq 0$ и $\alpha = 90^\circ$ частота восприятия $f' = f$, так как знаменатель в варианте (3): $(c - v_{\text{и}} \cos 90^\circ) = c$.

3.55. Первый кричит Второму против ветра. Частота звука Первого равна f . Какую частоту f' услышит Второй, если скорость ветра равна v , а скорость звука в воздухе – c ?

3.56. Вертикальная скорость погружения подводной лодки определяется гидролокатором, направленным вертикально вниз. Гидролокатор излучает звуковые волны на частоте $f_0 = 100,0$ кГц, а отраженный от дна сигнал воспринимается на частоте $f = 100,2$ кГц. Определить скорость погружения v , если скорость звука в воде $c = 1500$ м/с. Считать, что $v \ll c$.

3.57. Два поезда идут встречными курсами с одинаковыми скоростями $v_1 = v_2 = 108$ км/ч. Первый даёт гудок на частоте $f = 400$ Гц. какую частоту f' будут слышать пассажиры второго: а) при сближении поездов; б) при удалении поездов ? Скорость звука в воздухе $c = 330$ м/с.

3.58. На одной нормали к стенке находятся источник звука частотой $f_0 = 1$ кГц и приёмник. Источник и приёмник неподвижны, а стенка удаляется от них со скоростью $v = 5$ м/с. Какую частоту f примет приёмник? Скорость звука в воздухе $c = 340$ м/с.

3.59*. Самолёт летит горизонтально со скоростью $v = 170$ м/с вдоль линии, проходящей над нами. Собственная частота звука мотора, $f_0 = 120$ Гц. Найти: 1) частоту звука f' , которую мы будем слышать, когда самолёт пролетает точно над нами; 2) угол γ (от вертикали), под которым мы будем видеть самолёт в тот момент, когда слышимая частота $f = f_0$. Скорость звука в воздухе $c = 340$ м/с.

3.5.2. Эффект Доплера для электромагнитных волн

Пусть: c – скорость света в вакууме,

v – скорость источника в системе приёмника, $\beta = v/c$;

ось x везде направлена от источника к приёмнику. Тогда:

1) $v \uparrow \uparrow$ оси x и $v \sim c$ (продольный релятивистский эффект Доплера).

$$f' = f \frac{c}{c - v} \sqrt{1 - \beta^2} = f \sqrt{\frac{c + v}{c - v}} \quad (\text{источник движется на нас, фиол. смещение}),$$

$$f' = f \frac{c}{c + v} \sqrt{1 - \beta^2} = f \sqrt{\frac{c - v}{c + v}} \quad (\text{источник движется от нас, красн. смещение}),$$

$$f' = f \frac{c}{c - v \cos \alpha} \sqrt{1 - \beta^2} \quad (\text{источник движется под углом } \alpha \text{ к линии «на нас»}).$$

2) $v \perp$ оси x и $v \sim c$ (поперечный релятивистский эффект Доплера).

При $\alpha = 90^\circ$: $f' = f \sqrt{1 - \beta^2}$ (красное смещение, возникающее только из-за эффекта замедления хода движущихся часов).

3) $v \ll c$, $\beta \ll 1$ (нерелятивистский эффект Доплера).

$$f' = f \frac{c}{c - v} \approx f \left(1 + \frac{v}{c}\right) \quad (\text{источник движется на нас}),$$

$$f' = f \frac{c}{c + v} \approx f \left(1 - \frac{v}{c}\right) \quad (\text{источник движется от нас}),$$

$$f' = f \frac{c}{c - v \cos \alpha} \approx f \left(1 + \frac{v \cos \alpha}{c}\right) \quad (\text{источник движется к нам под углом } \alpha).$$

3.60. Один шофёр-физик, проехавший красный светофор, объяснял постовому, что из-за доплеровского смещения красный свет ($\lambda = 660$ нм) был виден ему как зелёный ($\lambda' = 550$ нм). Оценить в нерелятивистском приближении, какой при этом должна быть скорость машины v .

3.61. Как движется некая звезда относительно нас, если линия титана $\lambda = 495$ нм в её спектре смещена в длинноволновую область на $\Delta\lambda = 0,17$ нм?

3.62. С какой скоростью удаляется от нас некоторая галактика, если линия водорода $\lambda = 434$ нм в её спектре смещена в длинноволновую область на $\Delta\lambda = 180$ нм?

3.63. При наблюдении линии $\lambda = 590$ нм на противоположных краях диска Солнца обнаружено доплеровское расхождение $\Delta\lambda = 8$ пм. Определить период T вращения Солнца, если его радиус $R = 700000$ км.

3.64. Определить температуру T (К) атомарного водорода, если его спектральная линия $\lambda = 655$ нм имеет доплеровское уширение $\Delta\lambda = 0,044$ нм.

3.65. Ручной СВЧ-спидометр работает на частоте $f_0 = 10$ ГГц. Машина едет «к нам» со скоростью $v = 15$ м/с (54 км/час). Найти смещение частоты Δf в отражённом луче.

3.65. Наземный радиолокатор работает на частоте $f = 10$ ГГц. Самолёт летит горизонтально «в нашу сторону» и виден в небе под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту. Смещение частоты принимаемых отражённых волн в радиолокаторе $\Delta f = 10$ кГц. Определить скорость v самолёта.

Подсказка. Самолёт отражает на той же частоте, которую воспринимает.

Раздел 4. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

4.1. Тепловое излучение

Закон Стефана-Больцмана: энергетическая (интегральная) светимость абсолютно чёрного тела $R = \varepsilon \sigma T^4$ (Вт/м²), где $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Излучаемый площадкой S поток энергии $\Phi_{\text{изл}} = RS = \sigma T^4 S$ (Вт).

Если тело является *серым* с коэффициентом черноты ε , то $R = \varepsilon \sigma T^4$.

Установившаяся температура тела T_x определяется балансом потоков:

$\Phi_{\text{изл}} = \Phi_{\text{погл}}$, где $\Phi_{\text{изл}} = \sigma T_x^4 S$, $\Phi_{\text{погл}}$ – поток, поглощаемый данным телом, который излучается каким-то другим телом с заданной температурой T .

4.1. Угольный стержень диаметром $D = 1$ см, длиной $l = 20$ см нагревается в вакууме током $i = 3$ А при напряжении $u = 100$ В. Установившаяся температура стержня $T = 730^\circ\text{C}$. Определить его коэффициент черноты ε .

4.2. Бесконечная плоскость имеет постоянную температуру $T_0 = 727^\circ\text{C}$ и излучает как серое тело с коэффициентом черноты $\varepsilon = 0,6$. Рядом с нею установлена чёрная с двух сторон пластинка, ориентированная параллельно плоскости. Полагая, что теплообмен в системе происходит только тепловым излучением, найти установившуюся температуру T ($^\circ\text{C}$) пластинки.

4.3*. Между двумя чёрными параллельными плоскостями с температурами T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$) помещён чёрный параллельный им экран. Какова будет установившаяся температура экрана T_3 , если теплообмен происходит только излучением? Во сколько раз такой экран уменьшает результирующий тепловой поток Φ_0 от первой плоскости ко второй?

4.4. Какую мощность P надо подводить к чёрному шару радиусом $r = 10$ см, чтобы поддерживать его температуру на 100° выше температуры среды $T_0 = 27^\circ\text{C}$? Теплообмен шара со средой считать только тепловым излучением. Среду полагать серым телом с коэффициентом черноты $\varepsilon = 0,2$.

4.5. Корпус космической станции – стальная сфера радиусом $r = 3$ м. Коэффициент черноты стали $\varepsilon = 0,5$. Найти максимальную мощность P всех приборов, работающих внутри станции, чтобы её температура не поднималась выше 27°C : а) без учёта её нагревания Солнцем; б) с учётом, полагая, что интенсивность солнечного излучения на станции $I = 1,4$ кВт/м²; в) какова будет температура на станции в варианте а), если мощность работающих приборов превысит максимально допустимую (для 27°C) на 20%?

Подсказка. Шар поглощает солнечное излучение своим сечением, а излучает всей поверхностью.

4.6. К лампочке подводится мощность $P = 100$ Вт. Лампочка окружена чёрным сферическим плафоном радиусом $r = 10$ см. Определить температуру плафона T , полагая, что он передаёт тепло только излучением:

а) без учёта температуры окружающей среды; б) с учётом, что температура окружающей среды $T_0 = 27^\circ\text{C}$; среду полагать серым телом с коэффициентом черноты $\varepsilon = 0,2$.

4.7*. Температура поверхности Солнца $T_\odot = 6000$ К. Диск Солнца виден с Земли под углом $\gamma = 0,5^\circ$. Определить интенсивность I (Вт/м²) солнечного излучения на расстоянии орбиты Земли.

4.8*. Интенсивность излучения Солнца на Земле $I = 1,4$ кВт/м², а его угловой размер с Земли $\gamma = 32'$. Считая Солнце абсолютно чёрным телом, определить температуру его поверхности T_\odot .

4.9. Известно, что интенсивность излучения Солнца на расстоянии орбиты Земли $I = 1,4$ кВт/м². В космосе на этом расстоянии от Солнца расположена тонкая чёрная с двух сторон пластинка, ориентированная плоскостью к Солнцу. Найти установившуюся температуру пластинки T (°C).

4.10*. Солнце излучает как абсолютно чёрное тело с температурой $T_\odot = 5800$ К. В космосе на орбите Марса расположена чёрная с двух сторон пластинка, ориентированная плоскостью к Солнцу. Оценить её установившуюся температуру T (°C), если угловой размер солнечного диска с Марса $\gamma = 21'$.

4.11*. Солнце излучает как абсолютно чёрное тело с температурой $T_\odot = 5800$ К. Оценить температуру T (°C) чёрного шара, находящегося от Солнца на расстоянии орбиты Земли. Угловой размер Солнца с Земли $\gamma = 32'$.

4.12*. Маленький железный шарик помещён в фокусе собирающей линзы диаметром $D = 10$ см, с фокусным расстоянием $f = 40$ см. На линзу нормально падает солнечный свет. Оценить установившуюся температуру шарика при следующих исходных предположениях: 1) интенсивность излучения Солнца $I_0 = 1400$ Вт/м²; 2) угловой размер солнечного диска $\gamma = 32'$; 3) шарик находится в вакууме, он поглощает и теряет энергию только излучением как чёрное тело (постоянная Стефана-Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ ед СИ).

4.13. Поток энергии, излучаемой Арктуром, в 100 раз больше потока энергии, излучаемой нашим Солнцем. Температура Арктура $T = 4500$ К, температура Солнца $T_\odot = 6000$ К. Во сколько раз Арктур больше Солнца?

4.14. Поток энергии, излучаемой Сириусом, в 22 раза больше потока энергии, излучаемой нашим Солнцем. Расстояние до Сириуса $r = 8,7$ св. года. На каком расстоянии от Солнца обе эти звезды будут выглядеть одинаково яркими, т. е. интенсивность излучения от них будут одинаковой?

4.15. Зачернённый медный шарик радиусом $R = 1$ см помещён в откачанный сосуд. Начальная температура шарика $T_0 = 900^\circ\text{C}$. Определить, через сколько минут (Δt) его температура T станет равной 100°C , если удельная теплоёмкость меди $c = 390$ Дж/(кг·К), а её плотность $\rho = 8900$ кг/м³. Излучением среды пренебречь.

4.16*. Представим космическую станцию в виде чёрной сферы радиусом $R = 2$ м и массой $m = 10$ тонн. И пусть у станции сломалась система энергообеспечения. Как показано в задаче **4.11**, если бы станция была достаточно долго на солнечной стороне Земли, то температура на ней установилась бы около 6°C . Но вот она вошла в тень Земли и стала охлаждаться. Оценить скорость её охлаждения (К/час), если её исходная температура $T_0 = 300$ К. Удельная теплоёмкость стали (оболочки станции) $c = 500$ Дж/(кг·К).

4.17*. Меркурий повёрнут к Солнцу всегда одной стороной, как и Луна к Земле. Поэтому одна сторона Меркурия очень горячая, а другая очень холодная, хотя Меркурий и находится к Солнцу довольно близко.

Оценить перепад температур на следующей одномерной модели. На расстоянии орбиты Меркурия в космосе находится плоская каменная плита, ориентированная плоскостью к Солнцу. Плита чёрная с обеих сторон. Определить температуры солнечной (T_2) и теневой (T_1) сторон плиты. Рассмотреть три варианта толщины плиты: 1) $h = 1$ м; 2) $h = 10$ м; 3) $h = 1$ км.

Теплопроводность камня $k = 3,0$ ед. СИ (Вт/(м·К));
 постоянная Стефана-Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ ед. СИ;
 расстояние от Солнца до Меркурия $R = 0,4R_3$, где R_3 – радиус орбиты Земли;
 интенсивность солнечного излучения на расстоянии Земли $I_3 = 1400$ Вт/м².

Подсказки.

1. Передача тепла от горячей стороны плиты к холодной происходит по закону Фурье: $\mathbf{j} = -k \nabla T$, где $\nabla T = (T_2 - T_1)/h$ (рис. 4.1).

2. Для упрощения расчёта, возможно, придётся принять, что $T_1^4 \ll T_2^4$.

3. Интенсивность солнечного излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния до Солнца.

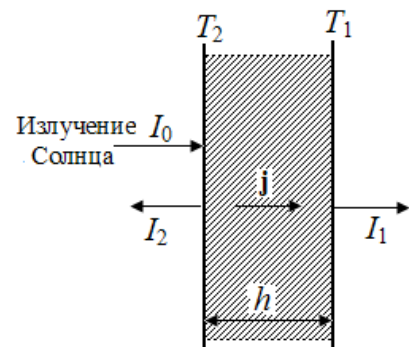


Рис. 4.1. Поток энергии в каменной плите

4.18*. Железный шарообразный астероид

приближается к Солнцу. На каком расстоянии r от Солнца он расплавится, если его температура плавления $T_{\text{пл}} = 1530^\circ\text{C}$, а его тепловое излучение происходит по закону Стефана-Больцмана? Постоянная Стефана-Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ ед. СИ, радиус орбиты Земли $R_0 = 150$ млн. км, интенсивность солнечного излучения на этом расстоянии $I_0 = 1400$ Вт/м².

4.2. Фотоэлектронная эмиссия

$hc/\lambda = A + mv^2/2$ – закон сохранения энергии, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $m = 0,9 \cdot 10^{-30}$ кг – масса электрона.

$p = n_e/n_\phi$ – квантовый выход фотокатода; здесь n_ϕ – число фотонов, упавших на фотокатод за 1 с, n_e – число выбитых фотоэлектронов за 1 с.

4.19. На рис. 4.1а показаны две вольт-амперные характеристики фотоэлемента, поочерёдно облучаемого световыми потоками Φ_1 и Φ_2 с длинами волн λ_1 и λ_2 . В каком случае больше световой поток, а в каком больше

длина волны?

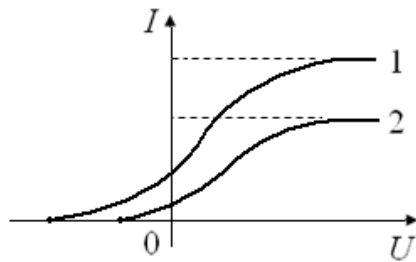


Рис. 4.2. ВАХ фотоэлемента при разных световых потоках и разных длинах волн

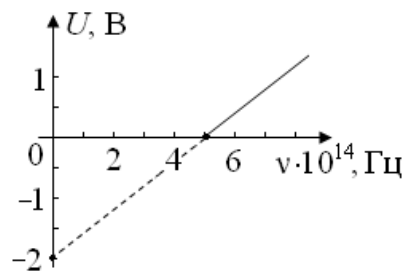


Рис. 4.3. Зависимость запирающего напряжения от частоты

4.20. На рис. 4.3 показана экспериментальная зависимость запирающего напряжения U от частоты ν падающего на фотокатод света. Определить работу выхода A и красную границу λ_0 для данного фотокатода.

4.21. Фотокатод облучается светом с длиной волны $\lambda = 400$ нм. Найти задерживающий потенциал U , если красная граница фотоэффекта $\lambda_0 = 670$ нм.

4.22. При поочерёдном облучении металла светом с длинами волн $\lambda_1 = 350$ нм и $\lambda_2 = 450$ нм задерживающие потенциалы U_1 и U_2 отличались в два раза. Определить работу выхода A (эВ).

4.23. Для калия красная граница фото-эффекта $\lambda_0 = 620$ нм. Какую максимальную скорость v могут иметь фотоэлектроны при облучении калия фиолетовым светом $\lambda = 420$ нм?

4.24. При облучении металла светом с длиной волны $\lambda_1 = 500$ нм фотоэлектроны задерживаются потенциалом $U_1 = 0,48$ В, а при облучении светом с длиной волны $\lambda_2 = 400$ нм – потенциалом $U_2 = 1,10$ В. Определить по этим данным постоянную Планка h .

4.25. До какого максимального потенциала зарядится уединённый вольфрамовый шарик при облучении его УФ лучами с длиной волны $\lambda = 140$ нм? Работа выхода для вольфрама $A = 4,5$ эВ.

4.26. При облучении вольфрамового шарика УФ лучами его потенциал в результате фотоэмиссии стал $+1,5$ В. Определить длину волны излучения, если работа выхода для вольфрама $A = 4,5$ эВ.

4.27. При облучении металла светом с длиной волны $\lambda_1 = 400$ нм задерживающий потенциал $U_1 = 1$ В. Какими должны быть задерживающие потенциалы U_2 и U_3 при облучении этого металла светом с длинами волн $\lambda_2 = 500$ нм и $\lambda_3 = 700$ нм ?

4.28. При освещении фотоэлемента жёлтым светом ($\lambda_1 = 600$ нм) его ЭДС $\mathcal{E}_1 = 1,2$ В. Какой будет его ЭДС \mathcal{E}_2 при его освещении фиолетовым светом ($\lambda_2 = 400$ нм)?

4.29. Красная граница фотоэффекта $\lambda_0 = 500$ нм. Определить длину волны λ света, которым надо облучать данный материал, чтобы фотоэлектроны полностью задерживались потенциалом $U = 3$ В.

4.30. При облучении одной из пластин плоского конденсатора светом с длиной волны $\lambda = 400$ нм из неё вылетают фотоэлектроны под разными углами α к нормали. Работа выхода из пластины $A = 2,5$ эВ. Вторая пластина (анод) имеет относительно первой потенциал $U = -0,3$ В, так что фотоэлектроны, вылетевшие из первой под углами $\alpha > \alpha_0$, не достигают анода. Определить этот предельный угол α_0 .

4.31. Одна из пластин плоского воздушного конденсатора ёмкостью $C = 50$ пФ облучается светом с длиной волны $\lambda = 600$ нм, и фотоэлектроны попадают на другую его пластину. Сколько таких электронов может накопиться на второй пластине? Работа выхода электрона из металла $A = 2$ эВ.

4.32. Фотокатод облучается светом с длиной волны $\lambda = 400$ нм. Световой поток, падающий на фотокатод, $\Phi = 15$ мВт. Найти фототок насыщения I фотоэлемента, полагая, что квантовый выход фотокатода $p = 0,01$, т. е. на 100 падающих фотонов приходится один фотоэлектрон.

4.3. Взаимодействие фотонов с веществом

Энергия фотона $E = h\nu = hc/\lambda$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Импульс фотона $p_\phi = E/c$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

$$\text{Интенсивность света } I = \frac{\Delta W}{\Delta t \Delta S} = \frac{(\Delta N)E}{\Delta t \Delta S} = \frac{\Delta N}{\Delta t \Delta S} E = \frac{\Delta P}{\Delta S} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right].$$

Давление света при нормальном падении: $p = (k + 1)I/c$ [Па] ($0 \leq k \leq 1$).

4.33. Человек в темноте может видеть свет, когда в зрачок его глаза попадает $n \approx 100$ фотонов в секунду. Определить соответствующую мощность P светового потока, воспринимаемого глазом. Длина волны $\lambda = 500$ нм.

4.34*. Точечный источник света мощностью $P = 1$ Вт (маленькая лампочка) даёт монохроматическое излучение с длиной волны $\lambda = 600$ нм. На него с расстояния $l = 100$ м смотрит человек. Сколько фотонов за 1 с попадает в зрачок его глаза, если радиус зрачка $R = 2$ мм?

4.35. Лазер мощностью $P = 2$ мВт излучает свет с длиной волны $\lambda = 630$ нм. Сколько фотонов, лазер излучает за одну секунду?

4.36. Найти силу F давления луча лазера мощностью $P = 30$ Вт на чёрную поверхность, нормальную к направлению луча.

4.37*. Мощность излучения лазера $P = 2$ мВт, сечение луча $S = 1$ мм², длина волны $\lambda = 630$ нм. Сколько фотонов приходится на 1 мм³ луча?

4.38. Во сколько раз давление фиолетового света ($\lambda_1 = 400$ нм) больше давления оранжевого ($\lambda_2 = 600$ нм) при одинаковой концентрации фотонов в пучке?

4.39*. Зелёный луч ($\lambda = 500$ нм) падает нормально на чёрную поверхность и оказывает на неё давление $p = 2 \cdot 10^{-3}$ Па. Оценить концентрацию фотонов в луче. Какова интенсивность такого луча?

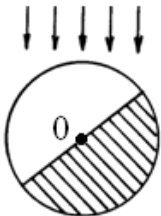


Рис. 4.4

4.40. Цилиндр в вакууме может свободно вращаться вокруг своей оси O (рис. 4.4). Половина поверхности цилиндра окрашена в чёрный цвет, а половина – зеркальная. Каким будет положение устойчивого равновесия цилиндра под действием света, падающего на цилиндр перпендикулярно его оси?

4.41. Молекула некоторого газа расщепляется зелёным светом ($\lambda = 480$ нм). Оценить температуру T , до которой надо нагреть газ, чтобы расщепление его молекул происходило при их столкновениях.

4.42*. Найти давление p пучка света интенсивностью I на чёрную площадку, перпендикулярную направлению пучка.

4.43*. По известным величинам: интенсивности солнечного излучения на расстоянии орбиты Земли $I_0 = 1,4 \text{ кВт/м}^2$, периоду движения Земли вокруг Солнца $T = 365$ суток и радиусу орбиты Земли $R_0 = 150$ млн. км – оценить радиус сферической частицы r , при котором сила её притяжения Солнцем на любом расстоянии от него будет уравновешена давлением солнечного излучения. Считать, что весь падающий на неё свет поглощается ею. Плотность частицы $\rho = 1 \text{ г/см}^3$.

4.44*. Плоская световая волна интенсивностью I падает на зеркальный шар радиусом R . Определить силу её давления на шар.

4.45*. Плоская световая волна интенсивностью I падает на зеркальный конус вдоль его оси. Радиус основания конуса R , угол между осью и образующей γ . Определить силу давления света на конус.

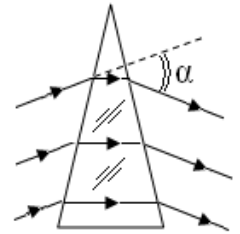


Рис. 4.5

4.46*. Параллельный пучок света мощностью $P = 9 \text{ Вт}$ падает на призму под тем же углом, под которым и выходит, отклоняясь от исходного направления на угол $\alpha = 39^\circ$ (рис. 4.5). Пренебрегая отражением и поглощением света, найти силу, с которой этот пучок действует на призму.

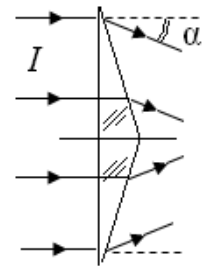


Рис. 4.6

4.47*. Параллельный пучок света интенсивностью I падает нормально на основание стеклянного конуса и отклоняется от исходного направления на угол α (рис. 4.6). Площадь основания конуса равна S . Пренебрегая отражением света от поверхностей стекла, найти силу, с которой этот пучок действует на конус.

4.48*. На линзу с фокусным расстоянием f падает нормально цилиндрический пучок света радиусом $R \ll f$, интенсивностью I . Пренебрегая отражениями от поверхностей линзы, найти силу давления пучка на линзу.

Замечание. Это вариация одной из задач XXXIV Международной физической олимпиады (Тайвань, 2003 г.).

4.49*. В цилиндре с зеркальным дном и зеркальным поршнем находится фотон, импульс которого направлен вдоль оси цилиндра, а энергия равна E_0 . Поршень начинают медленно продвигать к дну цилиндра. Какова будет энергия фотона, когда расстояние между поршнем и

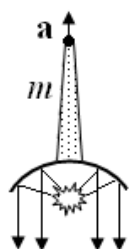


Рис. 4.7

дном уменьшится в k раз? Во сколько раз при этом увеличится сила давления фотона на поршень?

4.50. Оценить мощность P источника света в фокусе рефлектора фотонной ракеты массой $m = 200$ т, чтобы она смогла развить ускорение $a = 10g$ (рис. 4.7).

4.4. Релятивистские энергия и импульс

$E = mc^2$ – релятивистская энергия частицы,

$p = mv$ – релятивистский импульс частицы, где $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ –

релятивистская масса частицы, m_0 – её масса покоя, v – скорость частицы.

$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$ – связь релятивистских энергии и импульса частицы.

4.51*. Определить длину волны λ электромагнитного излучения, энергия одного кванта которого равна энергии покоя электрона. С какой скоростью v должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу такого фотона?

4.52*. π^0 -мезон, летящий со скоростью $v = 2 \cdot 10^8$ м/с, распадается на два фотона, разлетающихся в противоположных направлениях. Найти отношение энергий этих фотонов.

4.53*. Релятивистский π^0 -мезон, разлетается на два фотона, разлетающихся в противоположных направлениях, при этом энергия одного фотона в 5 раз больше энергии другого. Найти: 1) скорость π^0 -мезона до распада; 2) его энергию mc^2 до распада; 3) энергии E_1 и E_2 и длины волн образовавшихся фотонов. Энергия покоя π^0 -мезона $m_0 c^2 = 135$ МэВ.

4.54. При аннигиляции электрона и позитрона образуются два одинаковых γ -кванта: $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$. Найти их длину волны, пренебрегая кинетической энергией частиц до реакции.

4.55. Используя законы сохранения, доказать, что реакция рождения пары «электрон-позитрон» из фотона: $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ невозможна в пустом пространстве (она возможна только на какой-либо третьей частице, например, на ядре атома, уносящем часть импульса).

4.56. Используя законы сохранения, показать, что при столкновении со свободной неподвижной частицей фотон не сможет передать ей всю свою энергию.

4.5. Эффект Комптона

Формула Комптона:

$$\lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos \theta),$$

где λ и λ' – длины волн падающих и рассеянных лучей, θ – угол рассеяния, $\lambda_C = h/(m_0 c) = 2,436$ пм – комптоновская длина волны (ей соответствует энергия $E_0 = hc/\lambda_C = m_0 c^2 = 510$ кэВ – это энергия покоя электрона).

При решении задач формулу Комптона удобно записывать в терминах энергий: так как энергия фотона $E = hc/\lambda$, то

$$1/E' - 1/E = (1/E_0)(1 - \cos \theta).$$

Кинетическая энергия электрона отдачи $T = E - E'$.

Импульс фотона $p = E/c$.

Для решения задач используются:

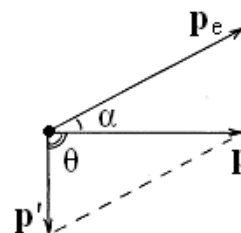


Рис. 4.8

- 1) формула Комптона;
- 2) закон сохранения энергии;
- 3) закон сохранения импульса, выражаемый диаграммой импульсов, подобной показанной на рис. 4.8; на этой диаграмме p и p' – импульсы падающего и рассеянного фотонов, p_e – импульс электрона отдачи, α – угол отброса электрона отдачи, θ – угол рассеяния фотона (на данной диаграмме $\theta = 90^\circ$).

4.57. Фотон с длиной волны $\lambda = 1$ пм рассеялся на свободном электроне под углом $\theta = 90^\circ$. Какую долю своей энергии фотон передал электрону? На какой угол α при этом отброшен электрон?

4.58. Фотон с энергией $E = 255$ кэВ рассеялся на свободном электроне на угол $\theta = 90^\circ$. Определить кинетическую энергию T (кэВ) электрона отдачи и направление α его движения. Энергия покоя электрона $E_0 = m_0 c^2 = 511$ кэВ.

4.59. Лучи с длиной волны $\lambda = 20$ пм испытывают комптоновское рассеяние под углом 90° . Определить энергию T (кэВ) и импульс электрона отдачи. Комптоновская длина волны $\lambda_C = \frac{h}{m_0 c} = 2,436$ пм.

4.60. Угол рассеяния фотона $\theta = 90^\circ$, а угол отдачи свободного электрона $\alpha = 30^\circ$. Определить: 1) кинетическую энергию T (кэВ) электрона отдачи; 2) длину волны λ падающего фотона; 3) длину волны λ' рассеянного фотона. Энергия покоя электрона $E_0 = m_0 c^2 = 511$ кэВ.

4.61. Угол рассеяния фотона на свободном электроне $\theta = 90^\circ$, а энергия падающего фотона распределилась поровну между рассеянным фотоном и электроном. Найти кинетическую энергию T (кэВ) электрона отдачи и

направление его движения (т. е. угол α). Энергия покоя электрона $E_0 = m_0 c^2 = 511$ кэВ.

4.62. Фотон рассеялся на свободном электроне и «покраснел» вдвое. Угол отдачи электрона $\alpha = 30^\circ$. Определить: 1) угол рассеяния θ ; 2) энергию рассеянного фотона E' (кэВ); 3) кинетическую энергию электрона T (кэВ). Энергия покоя электрона $E_0 = m_0 c^2 = 511$ кэВ.

4.63. Фотон с энергией $E = 750$ кэВ рассеялся на свободном электроне на угол $\theta = 60^\circ$. Найти кинетическую энергию T (кэВ) электрона отдачи и направление α его движения. Энергия покоя электрона $E_0 = m_0 c^2 = 511$ кэВ.

4.64. Фотон с энергией $E = 255$ кэВ рассеялся на свободном электроне на угол $\theta = 180^\circ$. Найти: 1) долю энергии δ , уносимую электроном отдачи; 2) импульс p_e электрона отдачи. Энергия покоя электрона $E_0 = m_0 c^2 = 511$ кэВ.

4.65. Фотон с длиной волны $\lambda = 10$ пм после столкновения с релятивистским электроном рассеялся на угол $\theta = 60^\circ$, а электрон при этом остановился. Определить длину волны λ' рассеянного фотона.

4.66. Фотон с длиной волны $\lambda = 10$ пм после столкновения с релятивистским электроном рассеялся на угол $\theta = 90^\circ$, а электрон при этом остановился. Определить длину волны λ' рассеянного фотона.

4.67. Фотон с длиной волны $\lambda = 10$ пм после столкновения с релятивистским электроном рассеялся на угол $\theta = 180^\circ$ (т. е. отразился от электрона назад), а электрон при этом остановился. Определить длину волны λ' рассеянного фотона.

4.68. Фотон с энергией $E = 170$ кэВ рассеялся на встречном релятивистском электроне под углом $\theta = 180^\circ$ (т. е. отразился от электрона назад), а электрон при этом остановился. Определить кинетическую энергию T встречного электрона. При какой энергии фотона E остановка электрона невозможна? Энергия покоя электрона $E_0 = 510$ кэВ.

Раздел 5. АТОМНЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

5.1. Атомные процессы

Уровни энергии электрона в атоме водорода

$$E_n = -13,6/n^2 \text{ [эВ]}, n = 1, 2, \dots, \infty.$$

При переходе электрона с орбиты с номером k на орбиту с номером n ($k > n$) атом водорода излучает квант света (фотон) с длиной волны λ_{kn} такой, что:

$$\frac{1}{\lambda_{kn}} = \frac{E_k - E_n}{hc} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \text{ (формула Бальмера),}$$

где $R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга.

Энергия ионизации атома водорода W_i – это энергия, которую необходимо сообщить атому водорода для перевода его электрона с основного уровня ($n = 1$) на бесконечность ($k = \infty$): $W_i = E_\infty - E_1 = 13,6 \text{ эВ}$.

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка.

$m_e = 0,9 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$ – масса электрона.

$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ – масса протона.

1 а. е. м. = $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ – атомная единица массы.

5.1*. Согласно идее Томсона, атом представляет собою шарообразное облако, равномерно заряженное по объёму с зарядом $e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$. Внутри этого облака колеблется «точечный» электрон с зарядом $-e$ и массой $m = 0,9 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$. Полагая, что положительное облако намного тяжелее электрона и не деформируется при его колебаниях, а радиус облака $R = 0,1 \text{ нм}$ (это примерный размер реального атома), найти длину волны λ (нм), излучаемой атомом Томсона при колебаниях электрона около центра облака.

5.2. Рассматривая электрон как классическую частицу, движущуюся по круговой орбите вокруг ядра с номером Z , выразить скорость v электрона и его полную механическую энергию E через радиус r его орбиты.

5.3*. Энергия ионизации атома водорода $W_i = 13,6 \text{ эВ}$. Полагая, что электрон в атоме водорода вращается по круговой орбите, определить её радиус r . Элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

5.4*. В планетарной модели атома водорода электрон движется по круговой орбите вокруг маленького тяжёлого положительного ядра – протона. При переходе электрона с одной орбиты на другую, меньшего радиуса, испускается фотон. Найти длину волны λ (нм) фотона при переходе электрона с орбиты радиусом $r_1 = 0,21 \text{ нм}$ на орбиту $r_2 = 0,11 \text{ нм}$. Константы: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, $1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ ед. СИ}$.

5.5*. Протон, летящий со скоростью $v_0 = 4,6 \cdot 10^4$ м/с, сталкивается с неподвижным свободным атомом гелия. После удара протон отскакивает назад со скоростью $v_0/2$, а атом переходит в возбуждённое состояние. Найти длину волны λ фотона, который излучит атом гелия, возвращаясь в невозбуждённое состояние. Задачу решать в нерелятивистском приближении.

5.6. В видимой части спектра лежат четыре линии излучения водорода. Самая длинноволновая линия – это $\lambda_1 = 655$ нм. Не используя значения постоянной Ридберга, найти длины волн остальных трёх линий.

5.7. Длина волны излучения атома водорода при переходе с третьей орбиты на вторую $\lambda_{32} = 655$ нм. Не используя численного значения постоянной Ридберга, определить длину волны λ_{21} , соответствующую переходу электрона со второй орбиты на первую.

5.8. Наибольшая длина волны излучения в видимой части спектра атома водорода $\lambda = 655$ нм. Определить постоянную Ридберга R в формуле Бальмера с точностью до двух цифр.

5.9. Атом водорода, находящийся в основном состоянии, поглощает фотон с длиной волны $\lambda = 75,3$ нм и ионизируется. Пренебрегая импульсом образовавшегося иона, найти скорость выбитого электрона.

5.10*. Неподвижный атом водорода *излучает* фотон, переходя из первого возбуждённого состояния в основное, в результате чего он приобретает некоторую скорость v . Определить эту скорость.

5.11*. Неподвижный атом водорода *поглощает* фотон, в результате чего он переходит в первое возбуждённое состояние и приобретает некоторую скорость v . Определить эту скорость.

Указания: 1) Задачу решать в нерелятивистском приближении.

2) При $x \ll 1$ и любом α можно принять: $(1 \pm x)^\alpha \approx 1 \pm \alpha x$.

5.12*. Атом иода I_{53}^{127} , «закреплённый» в кристаллической решётке, при некотором электронном переходе ΔE излучает фотон с длиной волны $\lambda_0 = 650$ нм. В газообразном состоянии при том же переходе он излучает фотон с несколько иной длиной волны λ . Найти относительное изменение $\delta = \Delta\lambda/\lambda_0$

5.2. Ядерные процессы

$\Delta m = (\sum m_p + \sum m_n) - M_{\text{я}}$ – дефект масс атомного ядра.

$E_{\text{св}} = \Delta mc^2$ – энергия связи атомного ядра.

$N(t) = N_0 2^{-(t/T)}$ – закон радиоактивного распада, где T – период полураспада.

5.13. Ядро распадается на два осколка массами m_1 и m_2 . Их общая кинетическая энергия равна E . Определить их скорости.

5.14. Ядро радона Rn_{86}^{222} испытывает α -распад. Сколько процентов кинетической энергии двух осколков уносит α -частица?

5.15. Протон с начальной скоростью v летит прямо на ядро гелия. Найти расстояние r_{\min} их наибольшего сближения.

5.16. α -частица с кинетической энергией $W = 100$ кэВ налетает на неподвижный протон. Найти скорости α -частицы (v_α) и протона (v_p) после такого столкновения, полагая его прямым и абсолютно упругим.

5.17*. К тяжёлому ядру золота Au_{79}^{197} издали по прямой приближается протон со скоростью $v_0 = 100$ м/с (рис. 5.1). На какое наименьшее расстояние r протон приблизится к ядру, если его *прицельный параметр* относительно ядра $h = 1$ мм? Масса протона $m \ll m_{\text{Au}}$, его удельный заряд $e/m = 10^8$ Кл/кг.

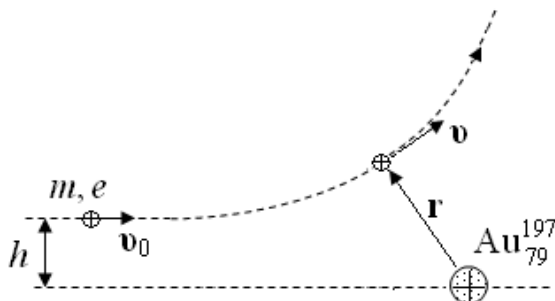


Рис. 5.1

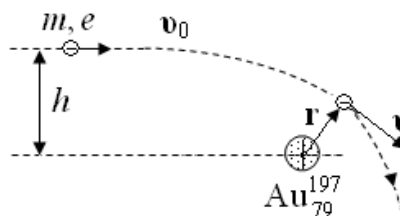


Рис. 5.2

5.18*. К тяжёлому ядру золота Au_{79}^{197} издали по прямой приближается электрон со скоростью $v_0 = 1$ км/с (рис. 5.2). На какое наименьшее расстояние r электрон приблизится к ядру, если его *прицельный параметр* относительно ядра $h = 10$ мм? Масса электрона $m \ll m_{\text{Au}}$, удельный заряд $e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

5.19*. α -частица, пролетая мимо покоившегося ядра углерода C_6^{12} , отклонилась на угол θ , потеряв 20% своей скорости. Полагая взаимодействие абсолютно упругим, определить этот угол θ , а также величину (p_c) и направление (φ) импульса ядра C_6^{12} , если исходный импульс α -частицы равен p_0 .

5.20*. Определить максимально возможный угол θ упругого рассеяния α -частицы на исходно покоящемся ядре водорода.

5.21*. Протон, пролетая мимо покоившегося ядра неизвестного элемента, отклонился на угол $\theta = 74,5^\circ$, а его скорость уменьшилась до $k = 0,9$ от исходной. Полагая взаимодействие частиц абсолютно упругим, найти массовое число A неизвестного элемента.

5.22. За 12 суток активность радиоактивного элемента уменьшилась в 8 раз. Определить его период полураспада T .

5.23. Определить период полураспада T радиоактивного элемента, если за сутки распался 1% всех его атомов.

5.24. Период полураспада радиоактивного йода I_{53}^{131} $T = 8$ сут. За какое время количество атомов йода уменьшится в 1000 раз?

5.25. Какая доля радиоактивных ядер некоторого элемента распадается за половину периода полураспада?

5.26. Период полураспада некоторого элемента равен 71 сутки. Сколько процентов этого элемента останется через 30 суток?

5.27*. При поднесении счётчика Гейгера к радиоактивному препарату F_9^{18} счётчик дал $n_1 = 11$ отсчётов в секунду, а через $\Delta t = 15$ мин он дал $n_2 = 10$ отсчётов в секунду. Определить период полураспада T изотопа F_9^{18} .

5.28. В результате слияния ядер дейтерия и трития образуется новое ядро и нейтрон. Принимая, что $m_n \approx m_p$, определить, сколько процентов выделившейся при реакции энергии уносит нейтрон. Кинетическую энергию исходных ядер не учитывать.

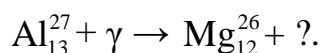
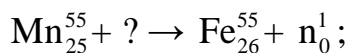
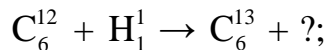
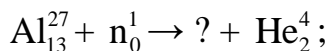
5.29. В результате реакции слияния ядер дейтерия H_1^2 и трития H_1^3 образуется новое ядро и нейтрон, и при этом выделяется $E_0 = 17,6$ МэВ энергии. Определить неизвестное ядро, а также полную энергию E , которая выделится при реакции 1 г дейтерия.

5.30*. Ядра дейтерия H_1^2 ускоряют до энергии $E_D = 2$ МэВ и направляют на тритиевую мишень (на неподвижные ядра трития H_1^3). В результате реакции $H_1^2 + H_1^3 \rightarrow He_2^4 + n$ выделяется энергия $E = 14$ МэВ (суммарная кинетическая энергия продуктов реакции), а нейтрон вылетает перпендикулярно направлению пучка дейтронов. Определить энергию нейтронов.

5.31. При бомбардировке α -частицами ядер Al_{13}^{27} образуется новое ядро и протон. Записать соответствующую реакцию.

5.32. При бомбардировке нейтронами ядер изотопа бора B_5^{10} образуется новое ядро и α -частица. Записать соответствующую реакцию.

5.33. Дописать недостающие обозначения в следующих реакциях:



5.34. Радиоактивный изотоп углерода C_6^{14} испытывает β^- -распад. Сколько нейтронов содержит ядро образовавшегося элемента? Записать соответствующую реакцию.

5.35. При позитронном β^+ -распаде (β^+ -распад) ядро углерода C_6^{11} превращается в новое ядро с испусканием позитрона e^+ . Сколько нейтронов содержит это новое ядро? Записать соответствующую реакцию.

5.36. При электронном захвате ядро бериллия Be_4^7 поглощает электрон и превращается в новое ядро. Сколько нейтронов содержит это новое ядро? Записать соответствующую реакцию.

5.37. При радиоактивном распаде ядра U_{92}^{238} испускаются три α -частицы и две β -частицы. По таблице Менделеева определить тяжёлое ядро, образующееся в результате этого распада.

5.38. Атомная масса хлора 35,5. Хлор имеет два изотопа: Cl_{17}^{35} и Cl_{17}^{37} . Найти их процентное содержание.

5.39. Найти электрическую мощность (в мегаваттах) атомной электростанции, расходующей в сутки $m = 220$ г урана U_{92}^{235} и имеющей КПД $\eta = 25\%$. При делении одного ядра урана выделяется энергия $E_0 = 200$ МэВ.

5.40*. Энергия, выделяемая при распаде ядра U_{92}^{235} обычно называется «ядерной», но на самом деле это в основном «электрическая» энергия. Она высвобождается, как только кулоновские силы отталкивания протонов в ядре превзойдут ядерные силы их притяжения.

Полагая, что ядро U_{92}^{235} распадается на два осколка с атомными номерами 55 и 37, а ядерные силы практически перестают действовать с расстояния $r = 1,5 \cdot 10^{-14}$ м, оценить: 1) энергию (МэВ), выделяемую при распаде одного ядра урана; 2) тротиловый эквивалент (в килотоннах) ядерной бомбы с 10 кг урана, если тепловой эквивалент тротила $q = 4$ МДж/кг.

5.41*. В калориметр с теплоёмкостью $C = 100$ Дж/К помещён образец радиоактивного кобальта Co_{27}^{61} массой $m = 10$ мг. Известно, что при распаде ядра кобальта выделяется энергия $E_0 = 2 \cdot 10^{-19}$ Дж. Через $t = 50$ мин температура калориметра увеличилась на $\Delta T = 0,06$ К. Определить период полураспада τ данного изотопа кобальта.

5.42*. Ампула с радиоактивным натрием Na_{11}^{24} охлаждается потоком воздуха. В начале опыта пропускаемый через теплообменник воздух нагревался на $\Delta T_1 = 2$ К, а через $t = 142$ мин – на $\Delta T_2 = 1,8$ К. Определить период полураспада τ данного препарата.

5.43*. В открытый контейнер объёмом 75 см^3 положили 1.5 г радиоактивного изотопа полония Po_{84}^{210} , а затем контейнер герметично закрыли. В результате α -распада полония давление в контейнере через 35 суток составило 140 кПа. Температура T в контейнере постоянна и равна 45°C . Атмосферное давление $p_0 = 100$ кПа. Найти период полураспада τ полония-210.

5.44*. Изолированный медный шарик радиусом $R = 9$ мм, покрытый тонким слоем радиоактивного полония Po_{84}^{210} массой $m = 3$ мг, помещён в вакуум. Из-за вылета α -частиц (${}^4_2\text{He}$) он приобретает заряд. Определить нарастание потенциала шарика со временем $\phi(t)$ и его предельное значение ϕ_{max} , если кинетическая энергия испускаемых α -частиц $W = 6$ МэВ.

Замечание. Закон радиоактивного распада имеет вид:

$$N(t) = N_0 2^{-(t/T)},$$

где N_0 – исходное число ядер радиоактивного вещества в момент $t = 0$, $N(t)$ – число ещё не распавшихся ядер в момент t , T – период полураспада, т. е. время, в течение которого распадается половина ядер, имеющихся в данный момент. Для полония Po_{84}^{210} период полураспада $T = 138$ суток.

5.45*. По современным представлениям, наше Солнце и планеты образовались в результате коллапса газопылевого облака, образовавшегося после взрыва сверхновой. Предполагается, что сразу после такого взрыва в облаке было примерно поровну изотопов урана U^{235} и U^{238} . Сейчас природный уран содержит $\eta_1 = 0,7\%$ изотопа U^{235} и $\eta_2 = 99,3\%$ изотопа U^{238} . Оценить, сколько лет назад произошёл взрыв той сверхновой, если периоды полураспада для изотопов U^{235} и U^{238} : $T_1 = 0,7 \cdot 10^9$ лет, $T_2 = 4,5 \cdot 10^9$ лет.

Раздел 6. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА

Релятивистская энергия тела $E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$, где m_0 – масса покоя,

$m_0 c^2$ – энергия покоя, $\beta = v/c$.

$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$ – релятивистская масса тела, m_0 – его масса покоя.

$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$ – связь релятивистских энергии и импульса частицы.

$T = E - m_0 c^2$ – кинетическая энергия тела.

$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1-\beta^2}$ – интервал времени, измеренный часами движущейся системы.

$l' = l \sqrt{1-\beta^2}$ – продольный размер движущегося тела.

$\frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t} = \mathbf{F}$, где $\mathbf{p} = m\mathbf{v} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \mathbf{v}$ – релятивистский импульс тела.

6.1. Каждую секунду Солнце излучает примерно $4,5 \cdot 10^{26}$ Дж энергии. Оценить уменьшение массы Солнца за секунду.

6.2. Оценить потерю массы Δm Солнцем за секунду вследствие его излучения, если известно, что на расстоянии орбиты Земли ($R = 150$ млн км) интенсивность солнечного излучения $I = 1400$ Вт/м².

6.3. Во сколько раз релятивистская масса частицы превышает её массу покоя при скорости $v = 0,9999 c$?

6.4. С какой скоростью должна двигаться частица, чтобы её полная энергия стала в 2 раза больше её энергии покоя?

6.5. При какой скорости кинетическая энергия частицы равна её энергии покоя?

6.6. Сколько энергии в расчёте на единицу массы покоя надо затратить, чтобы сообщить изначально покоящемуся кораблю скорость $v = 0,98 c$?

6.7. На какую долю изменится масса льда при плавлении? Удельная теплота плавления льда $\lambda = 330$ кДж/кг.

6.8*. Какую ускоряющую разность потенциалов прошёл электрон, если он приобрёл скорость $v = 0,9 c$?

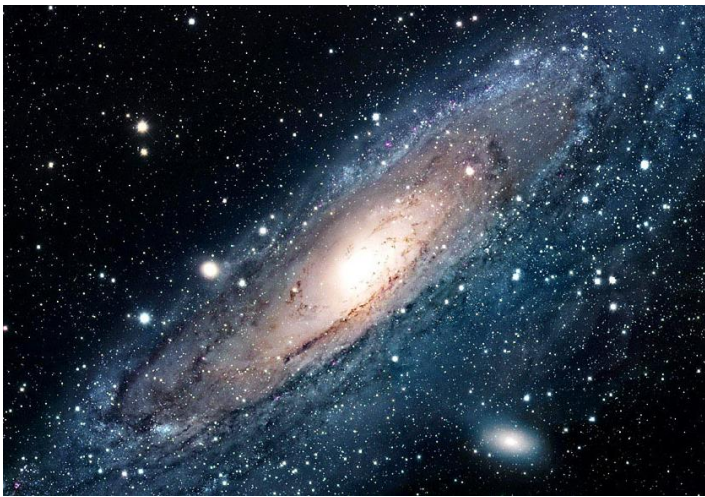
6.9*. Какова будет полная энергия электрона при прохождении им разности потенциалов 1 МВ. Какова при этом станет его кинетическая энергия? Принять, что энергия покоя электрона $E_0 = m_0 c^2 = 500$ кэВ.

6.10. Две одинаковые частицы массами m каждая летят навстречу друг другу с одинаковыми скоростями v . Найти эту скорость, если при их столкновении образовалась частица массой M .

6.11*. Частица массой m_0 начинает двигаться под действием постоянной силы F . Найти зависимость её скорости от времени $v(t)$.

6.12*. Электрон начинает двигаться в однородном поле $E = 1$ МВ/м. Через какое время кинетическая энергия электрона станет равной его энергии покоя?

6.13*. В космических лучах встречаются протоны с энергией порядка 10^{13} МэВ. Сколько времени потребуется такому протону «с его точки зрения», чтобы пересечь нашу галактику диаметром $D \sim 10^5$ световых лет? Энергия покоя протона $m_0 c^2 = 938$ МэВ $\approx 10^3$ МэВ.



6.14*. Для земного наблюдателя размер галактики Туманность Андромеды (рис. 6.1) составляет примерно 100 тыс. световых лет. Какого размера покажется эта галактика для того быстрого протона из задачи **6.13** ?

Рис. 6.1. Галактика Туманность Андромеды

6.15. Скорость ракеты $v = 0,99 c$. По своим часам ракета находилась в полёте время $\Delta t' = 1$ год. Сколько лет при этом прошло на Земле ?

6.16. Расстояние до Веги 27 световых лет. Сколько времени для жителей Земли и для космонавтов займёт полёт до Веги и обратно на корабле, летящем со скоростью $v = 0,999 c$.

6.17. Стержень движется в продольном направлении со скоростью v . При каком значении v длина стержня в лабораторной системе будет в 2 раза меньше его собственной длины?

6.18. Вагон длиной $2l$ движется со скоростью v . В середине вагона происходит короткая вспышка. Найти времена прохождения света до передней (τ_1) и до задней (τ_2) стенок вагона с точки зрения пассажиров вагона и соответствующие времена (τ'_1 и τ'_2) с точки зрения «людей на платформе».

6.19. По прямой друг за другом летят две частицы с одинаковыми скоростями $v = 0,9 c$ и падают на мишень с интервалом времени $\Delta t = 1$ нс. Какое расстояние было между частицами с нашей и с их точки зрения ?

6.20. Собственное время жизни некоторой частицы $\tau' = 10$ нс. Какой путь пролетит эта частица до распада в лабораторной системе отсчёта, где её время жизни $\tau = 20$ нс?

6.21. Короткоживущая частица, летящая со скоростью $v = 0,999 c$, оставляет в камере Вильсона трек длиной $l = 3$ см, т. е. в лабораторной системе она живёт время $\tau = l/(0,999 c) \approx l/c = 10^{-10}$ с. Какое время τ' эта частица живёт «с её точки зрения»? Какое расстояние она пролетает «с её точки зрения»?

6.22*. Нейтронные звёзды (пульсары) имеют нейтронную плотность $\rho \sim 10^{17}$ кг/м³. Оценить наименьший радиус R такой звезды, при котором фотон, излучённый с её поверхности, не сможет преодолеть её гравитационного поля, т. е. нейтронная звезда станет чёрной дырой. Гравитационная постоянная $G = 1/(15 \cdot 10^9)$ ед. СИ.

6.23*. Первый и Второй родились одновременно. Первый жил у моря, а Второй в горах, на высоте $h = 1$ км. Через 30 лет они встретились. Из-за того, что они жили в разных гравитационных полях, темп времени у них был разным. Оценить, на сколько при встрече Второй оказался старше Первого.

6.24*. Бетатрон – это индукционный ускоритель электронов, в котором их ускорение осуществляется вихревым электрическим полем.

Бетатрон состоит из тороидальной вакуумированной камеры, помещённой между полюсами электромагнита специальной формы (рис. 6.2). Если в обмотке электромагнита быстро (за несколько миллисекунд) изменять ток, то меняющееся между полюсами магнитное поле \mathbf{B} индуцирует в тороидальной камере вихревое электрическое поле \mathbf{E} :

$$\oint_{2\pi R} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_{\pi R^2} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S},$$

где R – средний радиус окружности тороидальной камеры. Это поле \mathbf{E} и будет ускорять вводимые в камеру электроны до энергий в несколько десятков МэВ, т. е. до ультрарелятивистских скоростей.

Пусть радиус окружности камеры $R = 0,1$ м, а среднее магнитное поле между полюсами растёт от нуля до $B_0 = 1$ Тл. Какую энергию (МэВ) при этом будут приобретать электроны? Какой при этом будет их скорость (в единицах c) ?

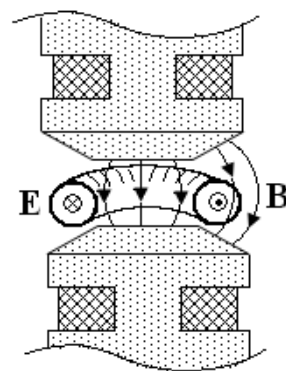


Рис. 6.2

6.25. Космический *ультрарелятивистский* протон, захваченный магнитным полем Земли $B = 40$ мкТл, движется вгруг Земли в плоскости экватора по окружности радиусом $R = 6700$ км. Найти энергию такого протона.

6.26. Серпуховской ускоритель протонов разгоняет их до энергии $E = 76$ ГэВ. Эти протоны движутся по окружности радиусом $R = 236$ м и удерживаются на ней магнитным полем, перепендикулярным к плоскости их орбиты. Найти необходимое для этого магнитное поле **B**.

ОТВЕТЫ

Раздел 1. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

1. Молекулярно-кинетическая теория

1.1. $N = N_A(m/M) = 2,14 \cdot 10^{22}$.

1.2. $m = M/N_A = 2 \cdot 10^{-26}$ кг.

1.3. $N = nV = \frac{P}{kT}V = N_A \frac{pV}{RT} = 2,6 \cdot 10^{22}$. Состав газа значения не имеет.

1.4. $N = N_A(\rho V/M) = 0,83 \cdot 10^{29}$.

1.5. $N_0 = (N_A \frac{\rho Sh}{M})/\tau = 1,2 \cdot 10^{15}$.

1.6. $t = 100$ часов ≈ 4 сут.

1.7. $N \approx 1000$ (молярная масса поваренной соли $M = 23+35,5 \approx 60$ г/моль).

1.8. $N = \rho(\pi R^3/\Delta m) = 98$ часов ≈ 4 суток.

1.9. $l \sim \sqrt[3]{V} \approx 0,3$ нм, где V – объём, приходящийся на одну молекулу H_2O .

1.10. $n = p/kT = 2,65 \cdot 10^{25}$ шт/м³; $d = \sqrt[3]{1/n} = \sqrt[3]{kT/p} = 3,35 \cdot 10^{-9}$ м.

1.11. $\lambda = 1/(4\pi r^2 n) = kT/(4\pi r^2 p) = 3,0 \cdot 10^{-7}$ м.

1.12. $t = 10^6 \cdot N \sim 10^{44}$ лет.

1.13. $a = 8 \cdot 10^{-10}$ м.

1.14. $\rho = 4M/(a^3 N_A)$.

1.15. $a = \sqrt[3]{2M/(\rho N_A)} = 0,287$ нм.

1.16. $a_\alpha/a_\gamma = \sqrt[3]{(1-\varepsilon)/2} = 0,788$.

1.17. Не изменится.

1.18. $p = (2/3) p_0$.

1.19. 75 кПа.

1.20. $\sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{3kT/m} = 0,15$ мм/с, где m – масса капельки тумана.

1.21. $v = \sqrt{3p/\rho} = 500$ м/с.

1.22. $\Delta T_2 = \Delta T_1((v_3^2 - v_2^2)/(v_2^2 - v_1^2)) = 110$ К.

1.23. Так как $n = N/V$, а $N = N_A v = N_A (m/M)$, то $n = \rho N_A/M = 1,75 \cdot 10^{29}$ м⁻³.

1.24. $5 \cdot 10^{-5}$.

1.25. $T = (T_0 + \frac{mv_c^2}{3k}) = 378$ К = 105°С, где $m = 29 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

2. Уравнение состояния. идеального газа

1.26. $M = \rho RT/p = 0,029$ кг/моль.

1.27. $\rho = pM/RT = 0,088$ кг/м³.

1.28. $p \approx 1400$ атм.

1.29. $\Delta m/m = (T_1 - T)/T_1 = 1/30$.

1.30. $p_2/p_1 = \sqrt{T_2/T_1} = 1,5$.

1.31. $p = (p_1 V_1 + p_2 V_2) / (V_1 + V_2)$.

1.32. $\Delta T = T_1(p_2/p_1 - 1) = 273 \text{ К}$.

1.33. $p = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} \right) \frac{RT}{V} = 250 \text{ кПа}$.

1.34. $T = 27 \text{ }^\circ\text{C}$.

1.35. $h = p_0 V_0 / (mg) - p_0 / (\rho g) = 40 \text{ м}$, где $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – ПЛОТНОСТЬ ВОДЫ.

1.36. $7 \cdot 10^{20}$.

1.37. –

1.38. Не зависит.

1.39. $F = pVMg(1/T_0 - 1/T)/R = 900 \text{ Н}$, где $M = 0,029 \text{ кг/моль}$.

1.40. $T = T_0 pMV / (pMV - m_0 RT_0) = 382 \text{ К} = 109 \text{ }^\circ\text{C}$, где $M = 0,029 \text{ кг/моль}$.

1.41. а) $\Delta x = \varepsilon V / (\pi R^2) = 10 \text{ см}$, где $\varepsilon = \Delta T / T = 1/273$; б) $\Delta x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{V}{\pi R^2} = 5 \text{ см}$.

1.42. $V_1 = (4/5)V$, $V_2 = (1/5)V$.

1.43. $x = \frac{l}{2} \left(\frac{p_2 - p_1}{p_2 + p_1} \right)$.

1.44. $\Delta l = l \Delta T / T = 1 \text{ см}$.

1.45. $\nu = \frac{mg h_1 h_2}{RT(h_1 - h_2)} = 0,024 \text{ моль}$.

1.46. $\Delta x_{1,2} = l_0$; $\Delta x_1 = 6 \text{ см}$, $\Delta x_2 = 9 \text{ см}$.

1.47. $p_0 = h(l^2 - \Delta x^2) / (2l\Delta x) = 76 \text{ см рт. ст.}$

1.48. $h = l + p_0/2 - \sqrt{p_0^2/4 + p_0 l} = 19 \text{ см}$.

1.49. $h = (h_0 + l - \sqrt{h_0^2 + l^2}) / 2 = 12 \text{ см}$.

1.50. $h = \frac{l}{2} \left(1 + \frac{l}{2h_0} \right) = 18 \text{ см}$.

1.51. $h_2 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{h_0^2 + 4h_0 h_1} - h_0 \right) = 23 \text{ см}$.

1.52. $h_x = \left(3h + h_0 - \sqrt{(h + h_0)^2 + 4h^2} \right) / 2 = 22 \text{ см}$.

1.53. $\Delta l = l \Delta T / T = 1 \text{ см}$.

1.54. –

1.55. –

1.56. –

1.57. –

1.58. –

1.59. $V_2 = \sqrt{V_1 V_3} = 2 \text{ л}$.

1.60. $V_{\max} = 100$ л (при $T = 600$ К, $p = 100$ кПа), $V_{\min} = 25$ л.

1.61. $\gamma = \frac{\ln 2,64}{\ln 2} = 1,4$.

1.62. $p_2 = p_1 (p_3/p_1)^\gamma = 1,64$ атм; $V_2 = V_1(p_1/p_2)^{1/\gamma} = V_1(p_1/p_3) = 1$ л.

1.63. $p_N = p_0(1 + N\Delta V/V)$.

1.64. $p_N = p_0 \left(\frac{V}{V + \Delta V} \right)^N$.

1.65. $\omega = \sqrt{2pS/(ml)}$.

1.66. $p = R \frac{v_1 T_1 + v_2 T_2}{V_1 + V_2} = 150$ кПа.

1.67. —

1.68. $\rho = (p - p_0) \frac{T}{T_0} \frac{M_{\text{п}}}{RT} = 300$ г/м³, где $M_{\text{п}} = 0,018$ кг/моль.

1.69. Уменьшилось.

1.70. —

1.71. $T_m = T_1(n + 1)^2 / (4n) = 400$ К.

1.72. $T_m = T_0/2 = 400$ К, $T_1 = T_0/4 = 200$ К, $T_2 = 3T_0/4 = 600$ К.

1.73. При $n > 1$ охлаждается, при $n < 1$ нагревается, при $n = 1$: $T = \text{const}$.

1.74. $\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_2 T_2}{v_1 T_1} = 40$.

1.75. $p = 1,3(mRT)/(MV) = 190$ кПа, где $M = 28$ г/моль.

1.76. $\delta = pV/(v_0 RT) - 1 = 12\%$.

1.77. $m_1 = 1,2$ г, $m_2 = 0,8$ г.

1.78. $T = (9/8)T_0$.

3. Первый закон термодинамики

1.79. $U = vC_V T = C_V(pV/R) = (5/2)pV = 750$ Дж.

1.80. Не изменилась.

1.81. $\Delta T = -2A/(3R) = -100$ К.

1.82. $T = 0,6T_0 = 300$ К.

1.83. $p/p_0 = 2$.

1.84. $Q = (3/2)V\Delta p = 300$ Дж.

1.85. $Q = (5/2)p\Delta V = 500$ Дж.

1.86. $Q = 3RT = 6,8$ кДж.

1.87. $Q = 5vRT = 12,5$ кДж

1.88. $A = Q(\gamma - 1)/\gamma = 1$ кДж.

1.89. 60% на увеличение внутренней энергии, 40% на совершение работы.

1.90. При изобарном.

1.91. $\eta = 5/2$.

1.92. $M = (mR\Delta T)/(Q_p - Q_v) = 0,032$ кг/моль.

1.93. $T_2 = T_1(1 + \frac{2Q}{3p_1V}) = 2T_1 = 273 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_2 = p_1(1 + \frac{2Q}{3p_1V}) = 2p_1 = 2 \text{ атм.}$

1.94. $Q = 1750 \text{ Дж}$, $\Delta U = 1250 \text{ Дж}$, $A = Q - \Delta U = 500 \text{ Дж.}$

1.95. $T_2 = 396 \text{ К} = 123 \text{ }^\circ\text{C}.$

1.96. –

1.97. $A = -157 \text{ Дж}$, $\Delta U = 20 \text{ Дж.}$

1.98. $A = (2/3)Q = 2 \text{ Дж.}$

1.99. На участке 1-2 газ получает тепло, а на участках 2-3 и 3-1 отдаёт.

1.100. –

1.101. –

1.102. Газ получает тепло везде.

1.103. В процессе 0-1.

1.104. В процессе 0-2.

1.105. $Q_{02} > Q_{01}.$

1.106. $Q_{01} > Q_{02}.$

1.107. Последнее, т. е. $Q_1 > Q_2$ (работа газа на обоих путях отрицательна).

1.108. $Q_I - Q_{II} = 4p_0V_0$; $Q_I/Q_{II} = 9/7.$

1.109. $Q_x/Q_n = 4/3.$

1.110. Третий.

1.111. $\eta = 2/9 = 22 \text{ } \%$.

1.112. $\eta_{\max} \approx 27\%$ при $n \rightarrow \infty.$

1.113. $A = R(T_1 + T_3 - 2\sqrt{T_1T_3}) = R(\sqrt{T_1} - \sqrt{T_3})^2.$

1.114. $\eta_3 = (\eta_1 - \eta_2)/(1 - \eta_2) = 10\%.$

1.115. $\eta = 1/8 = 12,5 \text{ } \%$.

1.116. $\eta = 1 - T_3/T_2.$

1.117. $\eta = 15\%$; $Q_x = Q_{23} = 1700 \text{ Дж.}$

1.118. $T_2 = 600 \text{ К}$, $\eta = 15,4\%.$

1.119. $\eta = 2/13 = 15,4\%.$

1.120. $A_{ц} = (5/2)\eta RT_0 = 1250 \text{ Дж}$, $Q_x = (5/2)(1 - \eta)RT_0 = 5 \text{ кДж.}$

1.121. $\eta = 2/23 = 8,7 \text{ } \%$; $T_1 = 272 \text{ К.}$

1.122. $A_{ц} = A_{12} - (5/2)R\Delta T = 250 \text{ Дж}$, $\eta = A_{ц}/Q_{12} = 1/6 \approx 16,7\%.$

1.123. $\eta = 58/93 \approx 62\%.$

1.124. $\eta = 1 - \frac{5(m-1)}{4(n^2-1)} = \frac{1}{6}.$

1.125. –

1.126. $A_{ц} = 250 \text{ Дж}$, КПД цикла $\eta = 25\%.$

1.127. $A_{23} = -1000 \text{ Дж}$, $\eta = A_{ц}/Q_{31} = 20\%.$

1.128. $\eta = 44\%.$

1.129. КПД данного цикла $\eta = 8\%$. $T_{\max} = 25 T_{\min}$; $\eta_{\max} = 1 - T_{\min}/T_{\max} = 96\%.$

- 1.130. $\eta = 4\%$.
- 1.131. $A_{\text{хол}}/A = 1/\eta - 1 = 2$.
- 1.132. $A = p_1 V_1 (T_2/T_1 - 1) = 100 \text{ Дж}$.
- 1.133. $\Delta U = 3R\Delta T/2 = 2555 \text{ Дж}$, $A = -R(3T + 2\Delta T)/4 = -2553 \text{ Дж}$.
- 1.134. $Q/Q_+ = 4/3$.
- 1.135. $Q = 90 \text{ Дж}$.
- 1.136. $Q = 90 \text{ Дж}$.
- 1.137. $x = 10 \text{ см}$.
- 1.138. $p_{\text{max}} = 9 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $V_2 = 0,17 \text{ л}$.
- 1.139. $C = 2R$.
- 1.140. —
- 1.141. $A = R(T_2 - T_1)/2$, $C = 2R$.
- 1.142. $T_1 = 400 \text{ К}$.
- 1.143. $A = 2R(T_2 - T_1)$, $C = (\Delta U + A)/\Delta T = (3/2)R + 2R = (7/2)R$.
- 1.144. $C = 2R$.
- 1.145. $A = -R(T_2 - T_1) > 0$, $\Rightarrow T_2 < T_1$; $C = R/2$.
- 1.146. $C = -R/2$.
- 1.147. —
- 1.148. $U_1/U_2 = 1/3$.
- 1.149. $C = 2,1 R$.
- 1.150. —
- 1.151. —
- 1.152. В цикле 3-2-4-3.
- 1.153. $\eta = 25\%$.
- 1.154. $\eta = 20\%$.
- 1.155. $Q = 4RT_1 = 10 \text{ кДж}$.
- 1.156. $\delta = (5\gamma - 7)/(3 - \gamma) = 0,23$.
- 1.157. $\delta = (2c_p M_0/R - 7)/3 = 0,36$, где $M_0 = 0,032 \text{ кг/моль}$.
- 1.158. —
- 1.159. —
- 1.160. $T_3 = 350 \text{ К} = 77^\circ\text{С}$.
- 1.161. $A_{12} = 300 \text{ Дж}$, $A_{23} = 200 \text{ Дж}$.
- 1.162. $A_{12} = Q_{23} = 400 \text{ Дж}$.
- 1.163. $\eta = 1 - (3/2)R\Delta T/A$.
- 1.164. $\Delta S = (C_p + C_v) \ln n = R(i + 1) \ln n = 34,6 \text{ Дж/К}$.
- 1.165. $A = 3R(T_{\text{н}} - T_{\text{х}}) \cdot \ln(2T_{\text{х}}/T_{\text{н}}) = 1 \text{ кДж}$.
- 1.166. $\eta = 1 - n^{1-\gamma} = 0,24$, где $\gamma = 1,4$ для двухатомного газа.
- 1.167. $\Delta S = 0$.
- 1.168. $\Delta S = (m/M) R \ln(p_1/p_2) = -5,8 \text{ Дж/К}$.

4. Фазовые превращения. Уравнение теплового баланса

1.169. $\eta = cm\Delta T/P = 40\%$.

1.170. $t_0 = t_1 t_2 / (t_1 + t_2) = 4$ мин.

1.171. $t_2 = \frac{rt_1}{2c_B(T_2 - T_1)} = 41$ мин.

1.172. —

1.173. $m_{\Pi} = 0,56$ кг.

1.174. $m_x = 100$ г.

1.175. $m_{\Pi} = (c_{\text{ст}} m_{\text{ст}}(T_2 - T_0) - c_B m_B (T_0 - T_1)) / (r + c_B(100 - T_0)) = 56$ г.

1.176. —

1.177. $T \geq \lambda \rho_{\text{л}} / (c_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}}) = 83$ °С.

1.178. 55 °С.

1.179. $m_0 = 18m = 1800$ г.

1.180. В сосуде при $T_0 = 0$ °С останется $m_x = 0,62$ кг льда.

1.181. Можно, если молоко нагревать литром воды по частям, например, по половине литра.

1.182. $k = \rho h \lambda d / (mg) = 0,02$.

1.183. $\Delta m \approx 20c/r \approx 110$ г.

1.184. $m_x/m = 0,1$; $T = -79$ °С.

1.185. $m_x/m = c_{\text{л}} \Delta T / \lambda = 5,1$ %.

1.186. $m_x/m = r / (r + \lambda) = 87$ %.

1.187. $\lambda = 5500$ Дж/моль.

1.188. $T_0 = (2T_1 + T_2 + T_3)/4 = 55$ °С.

1.189. Если $\Delta T_1 = -1$ °С, то $\Delta T_2 = +0,4$ °С, $\Delta T_3 = +1,6$ °С.

1.190. $N = 5$.

1.191. $T_{\text{м}} = \frac{T_{100}(e-1) + T_0}{e} = 63,2^\circ$.

1.192. —

1.193. —

1.194. На 10000 лет.

1.195. $\Delta t = 1,1$ с.

5. Пар и его характеристики

1.196. —

1.197. Первый.

1.198. При $p = 2,33$ кПа.

1.199. При 70 °С.

1.200. $\varphi = 36\%$.

1.201. 10 г/м³.

1.202. 2% .

- 1.203. 54 %.
- 1.204. 87 %; 12 °C; $m_{\text{росы}} = 2,1$ г.
- 1.205. $\Delta m = \Delta \rho [\text{г/м}^3] \cdot V [\text{м}^3/\text{мин}] \cdot 60 \text{ мин} = 27$ г.
- 1.206. $\Delta m = 12$ г.
- 1.207. $m_0 = 15$ г.
- 1.208. 200 кПа.
- 1.209. $p = 40$ кПа, $\varphi = 40$ %.
- 1.210. 80 %
- 1.211. $\nu_{\text{He}} = 1$ моль.
- 1.212. $\nu_{\text{N}_2} = 1,2$ моль.
- 1.213. 29 %.
- 1.214. –
- 1.215. $V_2 = V_1 (\varphi_1 / \varphi_2) = 0,8$ л; $\Delta m = 6$ мг.
- 1.216. $p = 10^5$ Па, $\Delta m = m_0 - pVM / (RT) = 4,2$ г, где $M = 0,018$ кг/моль.
- 1.217. $p_2 = p_1 (T_2 / T_1) + p_{100}^{\text{нас}} = 233$ кПа.
- 1.218. $F = p_0 ST / T_0 = 600$ Н, где $T_0 = 293$ К, $T = 373$ К.
- 1.219. $p = 310$ кПа.
- 1.220. $\langle l \rangle \approx \sqrt[3]{kT/p} \approx 3,7$ нм.
- 1.221. $p_{\text{вл}} / p_{\text{сух}} = 0,992$.
- 1.222. $Q = \Lambda / 2 + 4R\Delta T$.
- 1.223. 2,2 г.
- 1.224. 158 кПа.
- 1.225. 56 кПа.
- 1.226. $p = 93$ кПа.
- 1.227. $mg = p_0 S(1 - \varphi) / \varphi$, $m = 400$ кг.
- 1.228. За 2 часа.
- 1.229. $p_{\text{п}}^{\text{нас}} = (2p_1 - p_2) / (2\varphi - 1) = 100$ кПа, $T = 100$ °C.
- 1.230. $p_{\text{п}}^{\text{нас}} = 100$ кПа, $T = 100$ °C.
- 1.231. $\varphi = 70\%$.
- 1.232. $\varphi_1 = \varphi_0(1 - H/p_0) = 0,72$.

Раздел 2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

2.1. Законы геометрической оптики

2.1. Облако.

2.2. $l = (D/\gamma)\cos \alpha = D/(2\gamma) = 10,7 \text{ м.}$

2.3. $l \approx 2a^2/D \approx 100 \text{ м.}$

2.4. $n \approx 12/(\pi l D^2) \approx 3 \text{ шт/мм}^3.$

2.5. $h/2.$

2.6. Нет.

2.7. –

2.8. $a = h/(\operatorname{tg} 2\alpha) = 1,8 \text{ м.}$

2.9. $a = h/\operatorname{tg} \alpha = 3,6 \text{ м.}$

2.10. –

2.11. Изменится на противоположное.

2.12. –

2.13. $h = H \frac{\sin(\beta + \alpha)}{\sin(\beta - \alpha)}.$

2.14. –

2.15. $\alpha = 120^\circ.$

2.16. Одинаково.

2.17. $\delta = \left(\frac{\sin(\alpha/3)}{\sin \alpha} \right)^2.$

2.18. Размер зайчика не меняется.

2.19. $h \approx 70 \text{ м}$ (это примерно 23-й этаж дома).

2.20. –

2.21. $D = \gamma h = 2,8 \text{ см}$ (угол γ здесь выражается, конечно же, в радианах).

2.22. –

2.23. –

2.24. $h = a^2/(\gamma b) = 288 \text{ см; } \sin \alpha = a/b, \alpha = 42^\circ.$

2.25. Бумажка будет закрывать изображение прикрытого левого глаза.

2.26. –

2.27. –

2.28. $h \leq (D/2)\sqrt{n^2 - 1} = 44 \text{ см.}$

2.2. –

2.30. –

2.31. $\alpha = \operatorname{arctg} n = 58^\circ.$

2.32. $\sin \alpha = (n/2)\sqrt{4 - n^2} = 0,96, \alpha = 74^\circ.$

2.33.-

- 2.34. $r \geq D/(n-1) = 5$ мм.
- 2.35. $R = 5,7$ см.
- 2.36. Круг радиусом $r = 2R = 2$ см, $S = 4\pi R^2$.
- 2.37. $l = Rn/\sqrt{n^2-1} = 12,8$ мм.
- 2.38. $r \leq R/n = 6,25$ мм.
- 2.39. $f = R/(n-1)$.
- 2.40. Не может.
- 2.41. $r = r_0/n = 0,5$ м.
- 2.42. $n=2$.
- 2.43. $\gamma = 30^\circ$.
- 2.44. $f = Rn/(n-1)$.
- 2.45. $b = 16$ см.
- 2.46. Диаметр зрачка больше толщины скрепки.
- 2.47. —
- 2.48. $\delta = 23^\circ$.
- 2.49. При $\varphi_{\max} = 0,5 \arcsin(1/n) = 19^\circ$.
- 2.50. $\varphi = 3^\circ$.
- 2.51. При $\delta = 60^\circ$.
- 2.52. При $\sin \alpha = \left(\sqrt{3(n^2-1)} - 1 \right) / 2$, $\alpha = 35,6^\circ$.
- 2.53. $\varphi = 36^\circ$.
- 2.54. $\delta = (n-1)\varphi$.
- 2.55. $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin[(\varphi + \delta)/2]}{\sin(\varphi/2)} = 1,5$.
- 2.56. $\sin \varphi \geq 2\sqrt{n^2-1}/n^2$, $\varphi \geq 77,4^\circ$.
- 2.57. —
- 2.58. Нет.
- 2.59. $S = \pi(r^2 - R^2)$, где $r = R(H+h)/H$, т. е. $S = \pi R^2 h(h+2H)/H^2$.
- 2.60. $S = 70,36 R^2$.
- 2.61. —

2.2. Тонкие линзы

- 2.62. —
- 2.63. —
- 2.64. $\beta = \alpha/4 = 1^\circ$.
- 2.65. $a = 2f$, $\operatorname{tg} \gamma = 4Rf/(4f^2 - R^2)$, $\gamma = 2,864^\circ$.
- 2.66. См. рис. P2.42.
- 2.67. —
- 2.68. —

2.69. –

2.70. $f = l h_1 h_2 / (h_2 - h_1)^2 = 30$ см.

2.71. –

2.72. –

2.73. $\Gamma = 1/6$.

2.74. Для собирающей $\Gamma = f/(a - f)$, для рассеивающей $\Gamma = f/(a + f)$.

2.75. $a = f(\Gamma - 1)/\Gamma = 12$ см.

2.76. $l = 4f = 40$ см; $\Gamma = 1$.

2.77. $a = f + \Delta x/2 = 25$ см, $\Gamma = h'/h = f/(a - f) = 4$.

2.78. При $t = 0$ изображение удаляется от объекта со скоростью $v = 3v_0$.

2.79. $f = a\Gamma/(\Gamma + 1) \approx a\Gamma = 1$ м.

2.80. $f = 20/201 \approx 0,1$ м.

2.81. $b = fn/(n + 1)$; линейное увеличение $\Gamma = 1/(n + 1) < 1$.

2.82. $b_1 = 30$ см, $b_2 = 60$ см.

2.83. –

2.84. $D = +1,5$ дптр.

2.85. $f = (l^2 - s^2)/(4l)$.

2.86. $H = \sqrt{h_1 h_2}$.

2.87. –

2.88. $D = (\Gamma + 1)^2/(\Gamma l) = 18$ дптр.

2.89. $d = 2f/\Gamma = 10$ см.

2.90. $f = 40$ см.

2.91. $f = ah/(a + H) = 25$ см.

2.92. $f = a(a - \Delta a)/(a + \Delta a) = 15$ см.

2.93. $\operatorname{tg} \beta = (1 - a/f)\operatorname{tg} \alpha$, $\beta = 5^\circ$.

2.94. $l = f(1 \pm d/D)$.

2.95. $D_1 = 5D$.

2.96. $r = 1$ см.

2.97. $r = 4R = 20$ см.

2.98. $l = 2f_1 f_2 / (f_1 - f_2) = 30$ см.

2.99. Если $a < f$, то $l = af/(f - a)$; если $a > f$, то $l = 3af/(a - f)$.

2.100. $f = 10$ см.

2.101. $\beta = 2\alpha$.

2.102. $x = \sqrt{fl}$.

2.103. На расстоянии $a_1 = 6$ см от одного источника и $a_2 = 18$ см от другого.

2.104. $f = \sqrt{s_1 s_2} = 12$ см.

2.105. $D = \gamma f = 3,7$ мм.

2.106. $I_\Phi \approx 2000$ кВт/м² = 200 Вт/см².

$$2.107. f = \frac{a_1 h_1 - a_2 h_2}{(h_1 - h_2)}.$$

$$2.108. x = h(\Gamma + 1) = 10 \text{ мм.}$$

$$2.109. x = ha/(a - f) = 6 \text{ мм.}$$

$$2.110. -$$

$$2.111. x = hb/f = 15 \text{ мм вниз.}$$

$$2.112. D = 1/a - 1/(a - l) = -1 \text{ дптр.}$$

$$2.113. -$$

$$2.114. b = 50 \text{ см.}$$

$$2.115. \tau \leq a\Delta h/(vf) = 1 \text{ мс.}$$

$$2.116. D = d(a/f - 1) = 4 \text{ мм, } a_2 = a/2 = 2 \text{ м.}$$

$$2.117. a_1 = aDf / (Df + ad) = 1,76 \text{ м, } a_2 = aDF / (Df - ad) = 2,31 \text{ м.}$$

2.3. Различные оптические системы

$$2.118. \text{Можно.}$$

$$2.119. b = f^2/a \text{ справа от правой линзы при любом } a; \Gamma = h'/h = f/a.$$

$$2.120. f_1 = d - f_2 = 6 \text{ см.}$$

$$2.121. -$$

$$2.122. b = f_2(f_1 + d) / (f_1 - f_2 + d) = 126 \text{ см справа от собирающей линзы.}$$

$$2.123. -$$

$$2.124. f_2 = 2 f_1.$$

$$2.125. -$$

$$2.126. b = 36 \text{ см слева от системы линз (изображение мнимое).}$$

$$2.127. \text{Возможны два варианта: } b = 40 \text{ см и } b = 10 \text{ см.}$$

$$2.128. b_2 = 60 \text{ см.}$$

$$2.129. a_1 = 25 \text{ см.}$$

$$2.130. -$$

$$2.131. a > 10 \text{ см.}$$

$$2.132. a_1 < f/3.$$

$$2.133. \Delta D = D_2 - D_1 = -5 \text{ дптр.}$$

$$2.134. D = -5 \text{ дптр.}$$

$$2.135. D = +3 \text{ дптр.}$$

$$2.136. D = -4 \text{ дптр; } a_1 = 16 \text{ см.}$$

$$2.137. a_1 = 25 \text{ см, } a_2 = 33 \text{ см.}$$

$$2.138. \Gamma = a_0 / f_{\text{ок}} = 10.$$

$$2.139. b = f \approx 3 \text{ см.}$$

$$2.140. \Gamma = f / f_{\text{ок}} = 25.$$

$$2.141. x = 1 \text{ см в сторону от объектива.}$$

$$2.142. \Gamma = f / a_0 = 12.$$

2.143. Увеличится в $a/(a - f)$ раз.

2.144. –

2.145. –

2.146. $s = 1,5 f = 45$ см.

2.147. –

2.148. –

2.149. $b = 60$ см, $\Gamma = 6$ (изображение действительное).

2.150. $b = f/2$ за линзой (изображение мнимое).

2.151. $b = \frac{af}{2a + f}$ (за линзой), $\Gamma = \frac{h'}{h} = \frac{b}{a}$ (изображение мнимое при любых a).

2.152. –

2.153. $a = l + d/n = 2,5$ м; $h = Hf/(a - f) = 2$ мм.

2.154. На экране будет узкое кольцо радиусом $R = f\alpha (n - 1) = 12$ мм.

2.155. $s = 3R$, $H = 2h$.

2.156. –

2.157. $f = \frac{a(a + d)}{d}$.

2.4. Фотометрия

2.158. $x_1 = 3$ м, $x_2 = 6$ м.

2.159. Увеличится в $1 + (64/125) \approx 1,5$ раза.

2.160. $h = R/\sqrt{2}$.

2.161. Уменьшится в $3,95 \approx 4$ раза.

2.162. –

2.163. –

2.164. Теряется 19 %.

2.165. Увеличится на 9%.

2.166. $h = 2d/\gamma \approx 2,3$ м (угол γ , разумеется, в радианах).

2.167. $Q_{\text{полнос}}/Q_{\text{экр}} = 1,22$.

Раздел 3. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

3.1. Монохроматичность света

$$3.1. h_{\max} = \frac{\lambda m}{2n} = 0,02 \text{ мм.}$$

$$3.2. l_{\text{ког}} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = 0,6 \text{ мм. } \tau = \frac{l_{\text{ког}}}{c} = \frac{\lambda^2}{c\Delta\lambda} = 2 \text{ пс; } N = \frac{l_{\text{ког}}}{\lambda} = 10^3.$$

$$3.3. \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{l_{\text{ког}}} = \frac{\lambda^2}{c\tau} = 0,06 \text{ нм. } N = \frac{\tau}{T} = \frac{c\tau}{\lambda} = 10^4.$$

$$3.4. \Delta \leq l_{\text{ког}} = \lambda^2 / \Delta\lambda = 0,5 \text{ мм.}$$

$$3.5. \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{l_{\text{ког}}} = \frac{\lambda^2}{c\tau} = 0,6 \text{ нм; } m = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{c\tau}{\lambda} = 1000.$$

$$3.6. \nu = 12 \text{ об/с.}$$

3.7. Верхний край фиолетовый, нижний красный.

$$3.8. h = l (n_{\text{ф}} - n_{\text{кр}}) \varphi = 1 \text{ см.}$$

$$3.9. \sin \varphi = n_0 k h.$$

3.2. Интерференция

$$3.10. 0,25 \text{ мм. Тёмное.}$$

$$3.11. \text{Удалить на расстояние } \Delta s_1 = s = 3 \text{ м или приблизить на } \Delta s_2 = s/3 = 1 \text{ м.}$$

$$3.12. n_{\text{мет}} = n_{\text{возд}} + N(\lambda / l) = 1,00044.$$

$$3.13. n_{\text{вод}} = n_{\text{возд}} - N(\lambda / l) = 1,00014.$$

$$3.14. \text{Сместятся вправо на } s = lh(n - 1)/d = 2 \text{ мм.}$$

$$3.15. N \approx 25.$$

$$3.16. N = 5 + 5 + 1 = 11.$$

$$3.17. h = (2k + 1)\lambda / (4n) \quad (k = 0, 1, \dots); \quad h_{\min} = \lambda / (4n) = 100 \text{ нм.}$$

$$3.18. h = 592 \text{ нм.}$$

3.19. К красному.

$$3.20. 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \lambda/2 = k\lambda. \quad k_{\text{кр}} = 1, k_{\text{с}} = 2. \quad h = \lambda(k + 1/2)/2,4 = 470 \text{ нм.}$$

$$3.21. 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k_{\text{ф}}\lambda_{\text{ф}}, \\ (2k_{\text{ж}} + 1)\lambda_{\text{ж}} / 2; \end{cases} \quad k_{\text{ф}} = 1, k_{\text{ж}} = 0; \quad h_{\min} = 250 \text{ нм.}$$

$$3.22. \Delta r_{56} = \frac{\sqrt{6} - \sqrt{5}}{\sqrt{3} - \sqrt{2}} \Delta r_{23} = 0,67 \text{ мм. } (r_k^{\text{тём}} = \sqrt{Rk\lambda}).$$

$$3.23. r_k = \sqrt{k\lambda R_1 R_2 / (R_2 - R_1)}.$$

$$3.24. n = 1,3.$$

$$3.25. N < \frac{\lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)}, \text{ где } \lambda_1 = 550 \text{ нм, } \lambda_2 = 600 \text{ нм, т. е. } N = 5.$$

$$3.26. r = \sqrt{mR\lambda} = 16 \text{ мм.}$$

3.3. Дифракция

3.27. $\rho_k = \sqrt{\frac{Rr_0}{R+r_0}} k\lambda = \sqrt{r_0 k\lambda} = 3 \text{ мм}; k = 5; \Rightarrow \text{светлый.}$

3.28. $\rho_k = \sqrt{\frac{Rr_0}{R+r_0}} k\lambda$. При $k = 1, R = r_0 = l/2$ диаметр $D = 2\rho = 1 \text{ мм. } I = 4I_0$.

3.29. $\rho_k = \sqrt{\frac{Rr_0}{R+r_0}} k\lambda$. При $k = 2, R = r_0 = l/2$ диаметр $D = 2\rho = 1 \text{ мм.}$

3.30. —

3.31. $r = l/2 = 50 \text{ см}; k = 8$.

3.32. $r_1 = 10 \text{ см}, r_2 = 90 \text{ см.}$

3.33. $k_{\max} = 3; \alpha_k = 17,5^\circ, 37^\circ, 64^\circ$.

3.34. $k_{\max} = 1; \varphi_1 = 23,6^\circ$ (фиолетовый), $\varphi_2 = 49,5^\circ$ (красный).

3.35. —

3.36. Перекрывания не будет нигде.

3.37. $\alpha_1 = 11,5^\circ, \alpha_2 = 22,3^\circ; x_1 = f \operatorname{tg} \alpha_1, x_2 = f \operatorname{tg} \alpha_2; \Delta x = 211 \text{ мм.}$

3.38. $b/\lambda = 1/\sin \alpha_1 = 5,76; m = k_{\max} = [b/\lambda] = 5; \sin \alpha_5 = 5 \sin \alpha_1, \alpha_{\max} = \alpha_5 = 60^\circ$.

3.39. Так как $R = \lambda/\Delta\lambda = k L/b$, то $b|_{k=1} = L\Delta\lambda/\lambda \approx 814 \text{ нм}; \sin \alpha = \lambda/b, \alpha = 46,5^\circ$.

3.40. $L_{\min} = 2\lambda^2/\Delta\lambda = 87 \text{ мм}; b = 2\lambda = 1020 \text{ нм. } L_1 = \lambda^2/\Delta\lambda = 44 \text{ мм.}$

3.41. $D = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\lambda} = \frac{k}{b \cos \alpha} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \approx 0,11 \frac{\text{град}}{\text{нм}}$.

3.42. $\gamma_m = \frac{\lambda}{D} \approx \frac{5 \cdot 10^{-7}}{0,1} \text{ рад} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 57 \cdot 3600 \approx 1''$.

3.43. $a = l\gamma = l\lambda/D; a_1 \approx 4 \text{ км}, a_2 \approx 40 \text{ м.}$

3.44. Разрешение радиолокатора $\gamma = \lambda/D \approx 0,5^\circ = 30'; l = sD/\lambda = 10 \text{ км.}$

3.45. Так как угловое разрешение $\gamma = \lambda/D$, то $l_{\max} = s D/\lambda = 16 \text{ м.}$

3.46. Уменьшится в 4 раза.

3.4. Поляризация

3.47. $\alpha_{\text{Бр}} = 53^\circ$.

3.48. $\alpha_{\text{Бр}} = 60^\circ$.

3.49. $\alpha = 90^\circ - \alpha_{\text{Бр}} = 37^\circ$.

3.508. 60° .

3.51. В 8 раз.

3.52. $p = \frac{\sin^2 \alpha}{1 + \cos^2 \alpha}$.

3.53. —

3.54. $p = \frac{3-1}{1-3\cos 2\varphi} = 0,8$.

3.5. Эффект Доплера

3.55. $f' = f$.

3.56. $v = c \frac{f - f_0}{f + f_0} \approx 1.5 \text{ м/с}$.

3.57. $f_1' = f \frac{c + v}{c - v} = 480 \text{ Гц}$, $f_2' = f \frac{c - v}{c + v} = 333 \text{ Гц}$.

3.58. $f = f' \frac{c}{c + v} = f_0 \frac{c - v}{c + v} = 971 \text{ Гц}$.

3.59. 1) $f' = \frac{f_0}{1 - v^2/c^2} = 160 \text{ Гц}$; 2) $\gamma = \text{arctg}(v/c) = 26,6^\circ$.

3.60. Так как $\lambda' = \lambda \frac{c - v}{c}$, то $v = c \left(1 - \frac{5}{6} \right) = 50000 \text{ км/с}$.

3.61. $v = c \Delta\lambda/\lambda = 103 \text{ км/с}$ (звезда движется на нас).

3.62. $v = 0,33c$.

3.63. $T = \frac{4\pi R\lambda}{c\Delta\lambda} \approx 25 \text{ сут}$.

3.64. $T = \frac{Mc^2}{12R} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)^2 = 4000 \text{ К}$, где $M = 0,001 \text{ кг/моль}$, $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$.

3.65. $\Delta f \approx f_0 (2v/c) = 1 \text{ кГц}$.

3.66. $v = c (\Delta f/f) = 300 \text{ м/с}$.

Раздел 4. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

4.1. Тепловое излучение

4.1. $\varepsilon = \frac{i u}{\pi D l \sigma T^4} = 0,85$.

4.2. $T = T_0 \sqrt[4]{\varepsilon/2} = 740 \text{ К} = 467^\circ\text{С}$.

4.3. $T_3^4 = (T_1^4 + T_2^4)/2$. Поток уменьшится в 2 раза.

4.4. $P = \sigma [(T_0 + \Delta T)^4 - \varepsilon T_0^4] 4\pi r^2 = 172 \text{ Вт}$.

4.5. —

4.6. —

4.7. —

4.8. —

4.9. $T = \sqrt[4]{I/(2\sigma)} = 60^\circ\text{С}$.

4.10. $T = T_\odot \sqrt{\gamma} / 2^{3/4} = -3,3^\circ\text{С}$.

4.11. $T = (T_\odot \sqrt{\gamma})/2 = 279 \text{ К} = 6^\circ\text{С}$.

4.12. $T = 1180^\circ\text{С}$.

4.13. В 18 раз.

4.14. $r_x = 1,53 \text{ св. года}$.

$$4.15. \Delta t = \frac{c\rho R}{9\sigma} \frac{T_0^3 - T^3}{T^3 T_0^3} = 1267 \text{ с} = 21 \text{ мин.}$$

4.16. –

4.17. –

$$4.18. r = \frac{R_0}{2T_{\text{пл}}^2} \sqrt{\frac{I_0}{\sigma}} = 3,6 \text{ млн км} \text{ (} r \text{ – это расстояние от центра Солнца).}$$

4.2. Фотоэлектронная эмиссия

$$4.19. \Phi_1 > \Phi_2; \lambda_2 > \lambda_1.$$

$$4.20. A = 2 \text{ эВ}, \lambda_0 = 600 \text{ нм.}$$

$$4.21. U = \frac{hc}{e} \left(\frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda \lambda_0} \right) = 1,25 \text{ В.}$$

$$4.22. A = hc \frac{2\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2} = 2,0 \text{ эВ.}$$

$$4.23. v = \sqrt{\frac{2hc}{m} \left(\frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda \lambda_0} \right)} = 580 \text{ км/с.}$$

$$4.24. h = \frac{e}{c} (U_2 - U_1) \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = 6,61 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с.}$$

$$4.25. hc / \lambda = A + eU, \quad U = 4,3 \text{ В.}$$

$$4.26. hc / \lambda = A + eU; \quad \lambda = 205 \text{ нм.}$$

$$4.27. \lambda_0 = 599 \text{ нм. } U_2 = U_1 - \frac{hc}{e} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = 0,38 \text{ В. При } \lambda_3 = 700 \text{ нм эмиссии нет.}$$

$$4.28. \varphi_2 = 2,2 \text{ В.}$$

$$4.29. \lambda = \lambda_0 / \left(1 + \frac{eU}{hc} \lambda_0 \right) = 227 \text{ нм.}$$

$$4.30. \text{Так как } \frac{m(v \cos \alpha)^2}{2} = eU, \text{ то } \cos^2 \alpha_0 = \frac{eU}{(hc / \lambda) - A} = \frac{1}{2}; \alpha_0 = 45^\circ.$$

$$4.31. N = C \frac{hc / \lambda - A}{e^2} = 2,25 \cdot 10^7.$$

$$4.32. I = p \frac{e\lambda}{hc} \Phi = 48 \text{ мкА.}$$

4.3. Взаимодействие фотонов с веществом

$$4.33. P = nh(c/\lambda) = 4 \cdot 10^{-17} \text{ Вт.}$$

$$4.34. n = \frac{P\lambda}{4hc} \left(\frac{R}{l} \right)^2 = 3 \cdot 10^8 \text{ шт/с.}$$

$$4.35. n = P\lambda / (hc) = 6,3 \cdot 10^{15} \text{ шт/с.}$$

$$4.36. F = P/c = 10^{-7} \text{ Н, где } c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с – скорость света.}$$

$$4.37. N = \frac{P\lambda V}{Shc^2} = 21000.$$

4.38. В 1,5 раза.

4.39. $n = p\lambda/(hc) = 5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$. $I = pc = 6 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$.

4.40. Зеркальная поверхность поворачивается к свету.

4.41. $T = 20000 \text{ К}$.

4.42. $p = I/c$.

4.43. $r = \frac{3}{16\pi^2} \cdot \frac{I_0 T^2}{c\rho R_0} \approx 600 \text{ нм}$.

4.44. $F = (I/c)\pi R^2$.

4.45. $F = 2 (I/c) \pi R^2 \sin^2 \gamma$.

4.46. $F = \frac{2P}{c} \sin \frac{\alpha}{2} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$. На рис. 4.5 сила направлена вверх.

4.47. $F = \frac{IS}{c} (1 - \cos \alpha)$. Сила направлена вдоль оси конуса.

4.48. $F = \frac{\pi I}{4c} \cdot \frac{R^4}{f^2}$.

4.49. $E = E_0(x_0/x) = kE_0$. $F = k^2 F_0$, где $F_0 = E_0/x_0$ – исходная сила давления фотона на поршень.

4.50. $P = cma/2 = 3 \cdot 10^{15} \text{ Вт}$, где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

4.4. Релятивистские энергия и импульс

4.51. $\lambda = \frac{hc}{m_0 c^2} = \lambda_c = 2,436 \text{ пм}$; $v = \frac{c}{\sqrt{2}} = 2,1 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$.

4.52. $\frac{E_1}{E_2} = \frac{c+v}{c-v} = 5$.

4.53. –

4.54. $\lambda = h/(mc) = 2,4 \text{ пм}$, где $m = 0,9 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$ – массы частиц e^- и e^+ .

4.55. –

4.56. –

4.5. Эффект Комптона

4.57. 71%.

4.58. $T = E - E' = 85 \text{ кэВ}$, $\alpha = 33,7^\circ$.

4.59. –

4.60. $T = E - E' = E_0 \left(\frac{4\sqrt{3}}{3} - 2 \right) = 158 \text{ кэВ}$; $\lambda = \frac{\lambda_c}{\sqrt{3} - 1} = 3,33 \text{ пм}$, $\lambda' = \lambda\sqrt{3}$.

4.61. $T = E_0 / 2 = 255 \text{ кэВ}$; $\text{tg } \alpha = p'/p = E'/E = 0,5$, $\alpha = 26,6^\circ$.

4.62. $\theta = 60^\circ$, $T = E' = E_0 = 511 \text{ кэВ}$.

4.63. $T = E - E' = E \left(\frac{E / (2E_0)}{1 + E / (2E_0)} \right) = 317 \text{ кэВ}$; $\alpha = 35^\circ$.

$$4.64. \delta = \frac{T}{E} = \frac{E - E'}{E} = 0,5; \quad p_e = \frac{3}{4} \frac{E_0}{c} = 2,04 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

$$4.65. \lambda' = \lambda - \lambda_C/2 = 8,8 \text{ пм}.$$

$$4.67. \lambda' = \lambda - 2\lambda_C = 5,2 \text{ пм}.$$

$$4.68. T = 2E^2/(E_0 - 2E) = 340 \text{ кэВ}. \text{ При } E \geq E_0/2 = 255 \text{ кэВ}.$$

Раздел 5. АТОМНЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

5.1. Атомные процессы

$$5.1. \lambda = 2\pi c/\omega = 118 \text{ нм}.$$

$$5.2. v = \sqrt{\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m r}}; \quad E = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r} < 0.$$

$$5.3. r = e^2/(8\pi\epsilon_0 W_i) = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

$$5.4. h \frac{c}{\lambda} = E_1 - E_2 = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) = 5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, \quad \lambda = 400 \text{ нм (фиолетовый)}.$$

$$5.5. \lambda = 600 \text{ нм}.$$

$$5.6. \lambda_2 = 485 \text{ нм}, \lambda_3 = 433 \text{ нм}, \lambda_4 = 409 \text{ нм}.$$

$$5.7. \lambda_{21} = \lambda_{32}/5,4 = 121 \text{ нм}.$$

$$5.8. R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}.$$

$$5.9. v = 1000 \text{ км/с}.$$

$$5.10. v = \frac{\Delta E_{12}}{mc} = \frac{3}{4} \frac{hR}{m} = 3,3 \text{ м/с}.$$

$$5.11. v = \frac{\Delta E_{12}}{mc} = \frac{3}{4} \frac{hR}{m} = 3,3 \text{ м/с}.$$

$$5.12. \delta = \frac{h}{2mc\lambda_0} = 8 \cdot 10^{-12}.$$

5.2. Ядерные процессы

$$5.13. v_1 = \frac{1}{m_1} \sqrt{2E \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}, \quad v_2 = \frac{1}{m_2} \sqrt{2E \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}}.$$

$$5.14. \delta = \frac{W_\alpha}{W_\alpha + W_{Po}} = \frac{1}{1 + W_{Po}/W_\alpha} = 0,98 = 98\%, \quad W_{Po}/W_\alpha = m_\alpha/m_{Po} = 4/218.$$

$$5.15. r_{\min} = \frac{5e^2}{4\pi\epsilon_0 m v^2}.$$

$$5.16. v_\alpha = v \frac{m_\alpha - m_p}{m_\alpha + m_p} = 0,6 v = 1430 \text{ км/с}, \quad v_p = v \frac{2m_\alpha}{m_\alpha + m_p} = 1,6 v = 3800 \text{ км/с}.$$

$$5.17. r = \frac{Ze(e/m)}{4\pi\epsilon_0 v_0^2} + \sqrt{\left(\frac{Ze(e/m)}{4\pi\epsilon_0 v_0^2} \right)^2 + h^2} \approx 2,6 \text{ мм}, \text{ где } Z = 79.$$

$$5.18. r = \sqrt{\left(\frac{Ze(e/m)}{4\pi\epsilon_0 v_0^2}\right)^2 + h^2} - \frac{Ze(e/m)}{4\pi\epsilon_0 v_0^2} \approx 2,4 \text{ мм, где } Z = 79.$$

$$5.19. \theta = 69,5^\circ, \varphi = 48,2^\circ, p_C = 1,04 p_0.$$

$$5.20. \theta = \arcsin(m/M) = 14,5^\circ.$$

$$5.21. A = \frac{M}{m} = \frac{1+k^2-2k\cos\Theta}{1-k^2} = 7, \text{ т. е. это ядро атома лития } \text{Li}_3^7.$$

$$5.22. T = 4 \text{ суток.}$$

$$5.23. T = 70 \text{ суток.}$$

$$5.24. t = 80 \text{ суток.}$$

$$5.25. 0,29.$$

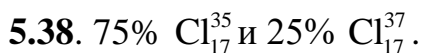
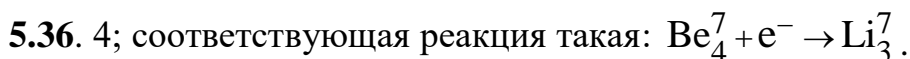
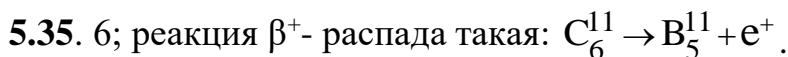
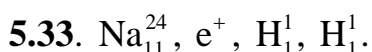
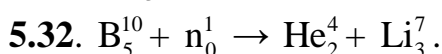
$$5.26. 75\%.$$

$$5.27. T = 109 \text{ мин.}$$

$$5.28. 80 \%.$$

$$5.29. \text{He}_2^4. E = E_0(m/M)N_A = 8,5 \cdot 10^{11} \text{ Дж, где } M = 0,002 \text{ кг/моль.}$$

$$5.30. E_n = (2/5)(2E - E_D) = 10,4 \text{ МэВ.}$$



$$5.39. P = \eta E_0 \frac{m}{M_U} \frac{N_A}{t} = 52 \text{ МВт, где } M_U = 0,235 \text{ кг/моль, } t = 86400 \text{ с.}$$

$$5.40. 1) E = 195 \text{ МэВ; } 2) m_{\text{трот}} = 200 \text{ килотонн.}$$

$$5.41. \tau = 95 \text{ мин.}$$

$$5.42. \tau = \frac{t}{\log_2(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = 934 \text{ мин} = 15,6 \text{ ч.}$$

$$5.43. \tau \approx 140 \text{ сут.}$$

$$5.44. -$$

$$5.45. t \approx 6 \text{ млрд лет назад.}$$

Раздел 6. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА

$$6.1. \Delta m = 5 \cdot 10^9 \text{ кг} = 5 \text{ млн тонн.}$$

$$6.2. \Delta m = \frac{I \cdot 4\pi R^2}{c^2} = 4,4 \cdot 10^9 \text{ кг} = 4,4 \text{ млн тонн.}$$

$$6.3. m/m_0 \approx 70.$$

6.4. $v = c\sqrt{3}/2 = 0,866 c$.

6.5. $v = c\sqrt{3}/2 = 0,866 c$.

6.6. $\frac{E}{m_0} = c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right) = 3,6 \cdot 10^{17} \text{ Дж/кг}$.

6.7. $\Delta m/m \approx +3,7 \cdot 10^{-12}$.

6.8. $\Delta\varphi = U = 662 \text{ кВ}$. Подсказка. $\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = m_0 c^2 + eU$.

6.9. $E = 3m_0 c^2 = 1,5 \text{ МэВ}$

6.10. $v = c\sqrt{1-(2m/M)^2}$.

6.11. $v = c \frac{1}{\sqrt{1+(m_0 c/Ft)^2}}$. При $t \rightarrow \infty$ скорость $v \rightarrow c$.

6.12. $t = \frac{c\sqrt{3}}{(e/m)E} = 3 \text{ нс}$.

6.13. $t = 315 \text{ с} \approx 5 \text{ мин}$.

6.14. —

6.15. $\Delta t = \Delta t' / \sqrt{1-(v/c)^2} = \Delta t' / 0,14 \approx 7\Delta t' = 7 \text{ лет}$.

6.16. Для Земли чуть больше 54 лет, для космонавтов 2,4 года.

6.17. $v = c\sqrt{3}/2 = 0,866 c$.

6.18. —

6.19. —

6.20. $l = c\tau \sqrt{1-\tau'^2/\tau^2} = 5 \text{ м}$.

6.21. $\tau' = \tau \sqrt{1-(v/c)^2} \approx 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ с}$; $l' = l \sqrt{1-(v/c)^2} = 0,134 \text{ см}$.

6.22. —

6.23. —

6.24. $E \approx 15 \text{ МэВ}$; $v = 0,9994 c$.

6.25. $E = mc^2 = qBRc = 1e \cdot BRc = 80 \text{ ГэВ}$, где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

6.26. $B = E/(eRc) = 1,07 \text{ Тл}$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ — заряд протона.
