

Давление света

[Овчинкин.Мех] → 4.88.

ЗАДАЧА 1. (МОШ, 2014, 8–11) У поверхности Земли на каждый квадратный метр площади, перпендикулярной направлению на Солнце, каждую секунду падает 1,4 кДж энергии излучения от Солнца.

А) Сколько солнечной энергии попадет за час на пластинку площадью 2 квадратных сантиметра, перпендикулярную направлению на Солнце? Ответ представьте в килоджоулях и округлите до второй значащей цифры.

В) Сколько солнечной энергии падает за секунду на площадку площадью 4 квадратных нанометра, расположенную перпендикулярно направлению на Солнце? Ответ представьте в электрон-Вольтах (эВ) и округлите до второй значащей цифры. Один нанометр — это миллиардная доля метра, 1 электрон-Вольт равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж (10^{-19} — это произведение 19 множителей 0,1).

С) Излучение можно представлять себе как поток частиц — фотонов. Энергия фотона жёлтого цвета составляет 2,1 эВ. Считая энергию всех фотонов одинаковой, определите, сколько фотонов падает за секунду на площадку площадью 4 квадратных нанометра, расположенную перпендикулярно направлению на Солнце. Ответ округлите до второй значащей цифры.

Д) Какая мощность излучается с площадки в 1 квадратный миллиметр поверхности Солнца? Ответ представьте в ваттах и округлите до второй значащей цифры. Радиус Солнца составляет 700 000 км, расстояние от Земли до Солнца 150 миллионов км.

Е) (дополнительный вопрос в 10–11 классах) Известно, что электромагнитная волна с энергией E переносит импульс E/c , где $c = 300000$ км/с — скорость света. Какое давление оказывает солнечный свет на зеркальную площадку, перпендикулярную направлению на Солнце? Ответ представьте в микропаскалях и округлите до второй значащей цифры.

(A) 1; (B) 35000; (C) 17000; (D) 64; (E) 9,3

ЗАДАЧА 2. (МФТИ, 1990) Кусочек металлической фольги массой $m = 1$ г освещается лазерным импульсом мощностью $W = 15$ Вт и длительностью $\tau = 0,5$ с. Свет падает нормально к плоскости фольги и полностью отражается от её поверхности в обратном направлении. Определить скорость, приобретённую фольгой в результате действия света.

$$c/m\tau = \frac{cm}{\tau W} = a$$

ЗАДАЧА 3. (МФТИ, 1990) Пылинка освещается импульсом лазерного света с длиной волны $\lambda = 6,3 \cdot 10^{-5}$ см. Определить число поглощённых пылинкой фотонов, если она в результате действия света приобрела скорость $v = 1$ мм/с. Масса пылинки $m = 0,1$ мг. Считать, что пылинка поглощает весь падающий на неё свет. Постоянная Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

$$9101 \cdot 9'6 \approx \frac{v}{\lambda m} = N$$

ЗАДАЧА 4. (МФТИ, 1987) Пучок лазерного излучения мощности $w = 100$ Вт падает на пластинку под углом $\alpha = 60^\circ$. Пластинка пропускает 40% падающей энергии, а остальную зеркально отражает. Найти абсолютную величину силы, действующей на пластинку со стороны света.

$$H \cdot 2 \cdot 10^1 \cdot 2 \approx v \cos \frac{\alpha}{m} = F$$

ЗАДАЧА 5. (МФТИ, 1987) Пучок лазерного излучения мощности $w = 100$ Вт падает на непрозрачную пластинку под углом $\alpha = 30^\circ$. Пластинка поглощает 60% падающей энергии, а остальную зеркально отражает. Найти абсолютную величину силы, действующей на пластинку со стороны света.

$$F \approx 0,1 \cdot 91,7 \approx 9,17 \text{ Н} = F$$

ЗАДАЧА 6. (МФТИ, 1992) Узкий пучок импульсного лазерного излучения с энергией $W = 0,4$ Дж и длительностью $\tau = 10^{-9}$ с падает на собирающую линзу параллельно её главной оптической оси. Расстояние от пучка до оси равно f (f — фокусное расстояние линзы). Найти величину средней силы, действующей на линзу со стороны света, если половина энергии лазерного излучения поглощается в линзе. Отражением от поверхности линзы пренебречь.

$$F \approx \frac{2W}{\tau} = F$$

ЗАДАЧА 7. (МФТИ, 1992) На плоскую поверхность тонкой плоско-выпуклой положительной линзы нанесено абсолютно отражающее покрытие. На выпуклую поверхность линзы падает узкий пучок импульсного лазерного излучения с энергией $W = 4$ Дж и длительностью импульса $\tau = 10^{-8}$ с. Падающий пучок распространяется параллельно главной оптической оси линзы на расстоянии $f/(2\sqrt{3})$ от оси (f — фокусное расстояние линзы). Найти величину средней силы, действующей на линзу со стороны света, если половина энергии лазерного излучения поглощается в линзе. Отражением от поверхности линзы (без покрытия) пренебречь.

$$F \approx \frac{2W}{\tau} \sqrt{1 + \frac{3}{4}} = F$$

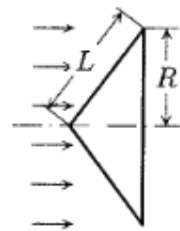
ЗАДАЧА 8. (МФТИ, 1992) На плоскую поверхность тонкой плоско-вогнутой отрицательной линзы нанесено абсолютно отражающее покрытие. На вогнутую поверхность линзы падает узкий пучок импульсного лазерного излучения с энергией $W = 5$ Дж и длительностью импульса $\tau = 10^{-8}$ с. Падающий луч распространяется параллельно главной оптической оси линзы на расстоянии $f/2$ от оси (f — фокусное расстояние линзы). Найти величину средней силы, действующей на линзу со стороны света, если половина энергии лазерного излучения поглощается в линзе. Отражением от поверхности линзы (без покрытия) пренебречь.

$$F \approx \frac{2W}{\tau} \sqrt{1 + \frac{1}{4}} = F$$

ЗАДАЧА 9. (МФТИ, 1992) Узкий пучок импульсного лазерного излучения с энергией $W = 0,5$ Дж и длительностью $\tau = 10^{-9}$ с падает на рассеивающую линзу параллельно её главной оптической оси. Расстояние от пучка до оси равно $f/\sqrt{3}$, где f — фокусное расстояние линзы. Найти величину средней силы, действующей на линзу со стороны света, если половина энергии лазерного излучения поглощается в линзе. Отражением от поверхности линзы пренебречь.

$$F \approx \frac{2W}{\tau} = F$$

Задача 10. (МФТИ, 2001) На деталь космического аппарата в форме прямого кругового конуса с радиусом основания $R = 20$ см и образующей $L = 25$ см падает солнечный свет параллельно оси конуса (см. рисунок). Интенсивность света (мощность, проходящая через единицу площади плоской поверхности, ориентированной перпендикулярно световым лучам) равна $I = 1,4$ кВт/м². С какой силой свет действует на деталь? Считать, что деталь отражает свет зеркально и полностью.

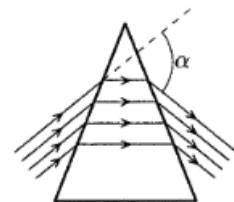


$$N_{\text{отр}} \cdot L \approx \frac{cI^2}{4\pi R^2} = F$$

Задача 11. (МФТИ, 2001) На полупрозрачное зеркало площадью $S = 100$ см², находящееся на орбите искусственного спутника Земли, падают солнечные лучи перпендикулярно поверхности зеркала. Зеркало отражает в обратном направлении 30% и пропускает в прямом направлении 20% энергии падающего света, а остальную энергию поглощает. Найти силу, действующую на зеркало со стороны света. Расстояние от Земли (зеркала) до Солнца $R = 150 \cdot 10^6$ км. Мощность излучения Солнца $N = 3,9 \cdot 10^{26}$ Вт.

$$\frac{c^2 H_{\text{отр}}}{4\pi R^2} = F$$

Задача 12. (МФТИ, 2001) Призма (см. рисунок) отклоняет параллельный пучок света на угол α ($\cos \alpha = 7/9$). Мощность пучка $N = 30$ Вт. Найти силу, с которой свет действует на призму. Отражением и поглощением света призмой пренебречь.



$$N_{\text{отр}} \cdot L \approx (v \cos \alpha - 1) \frac{c^2 N}{N} = F$$

Задача 13. (МФТИ, 2001) Лампочка излучает изотропно световую энергию мощностью $N = 40$ Вт. На расстоянии $R = 1$ м от лампочки перпендикулярно световым лучам расположено небольшое полупрозрачное зеркальце площадью $S = 1$ см². Зеркальце отражает в обратном направлении 20% и поглощает 30% энергии падающего света, а остальную энергию пропускает в прямом направлении. С какой силой свет действует на зеркальце?

$$N_{\text{отр}} \cdot L \approx \frac{c^2 H_{\text{отр}}}{4\pi R^2} = F$$

Задача 14. (МОШ, 2006, 11) Для обоснования формулы, связывающей массу и энергию, А. Эйнштейн предложил следующий мысленный эксперимент. Два тела с массами m_1 и m_2 находятся на концах лёгкой неподвижной тележки длиной L , которая может свободно перемещаться по горизонтальной поверхности без трения. Одно из тел испускает фотон с частотой ω , который поглощается вторым телом. Чему будет равна скорость тележки после испускания фотона до его поглощения? А после поглощения фотона? На какое расстояние сместится тележка в рассматриваемом процессе? На какую величину Δm должна уменьшиться масса первого тела и увеличиться масса второго тела, чтобы центр масс системы после поглощения фотона остался на месте? Постоянная Планка равна \hbar , скорость света c .

$$\frac{c^2}{\omega} = \omega \Delta : \frac{(m_1 + \hbar \omega) c^2}{L \omega} = s : 0 = \tau_a : \frac{(m_1 + \hbar \omega) c^2}{\omega} = \tau_a$$

Задача 15. (МОШ, 2015, 11) Шар радиусом R с зеркальной поверхностью освещают широким параллельным пучком света. Какую часть шара и каким образом нужно покрасить чёрной краской, чтобы сила светового давления на шар оказалась максимальной?

$$\left(\frac{c^2}{L} - 1 \right) R = \dots$$

ЗАДАЧА 16. (*IPhO, 2003*) A transparent glass hemisphere with radius R and mass m has an index of refraction n . In the medium outside the hemisphere, the index of refraction is equal to one. A parallel beam of monochromatic laser light is incident uniformly and normally onto the central portion of its planar surface, as shown in Figure 3. The acceleration of gravity \vec{g} is vertically downwards. The radius δ of the circular cross-section of the laser beam is much smaller than R . Both the glass hemisphere and the laser beam are axially symmetric with respect to the z -axis.

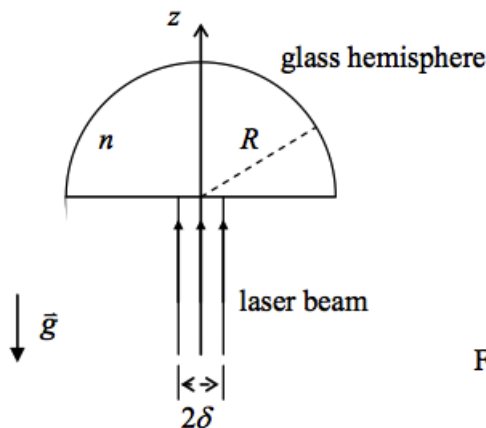


Figure 3

The glass hemisphere does not absorb any laser light. Its surface has been coated with a thin layer of transparent material so that reflections are negligible when light enters and leaves the glass hemisphere. The optical path traversed by laser light passing through the non-reflecting surface layer is also negligible.

Neglecting terms of the order $(\delta/R)^3$ or higher, find the laser power P needed to balance the weight of the glass hemisphere.

Hint: $\cos \theta \approx 1 - \theta^2/2$ when θ is much smaller than one.

$$\frac{2\delta^2 z (1-n)}{2R^2 c^2 m} = d$$

ЗАДАЧА 17. (*Всеросс., 1994, финал, 11*) Вокруг Солнца по орбите Земли обращается спутник, масса которого $m = 100$ кг. В некоторый момент спутник открывает солнечный парус — тонкую зеркальную плёнку в форме круга радиуса $r = 70$ м. Во время дальнейшего полёта парус непрерывно меняет свою ориентацию таким образом, чтобы его плоскость постоянно располагалась перпендикулярно направлению на Солнце. Пренебрегая влиянием планет, найдите период обращения спутника с открытым парусом. Орбиту Земли можно считать круговой. Светимость Солнца (световая мощность) $L = 3,86 \cdot 10^{26}$ Вт, масса Солнца $M = 2 \cdot 10^{30}$ кг, гравитационная постоянная $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Дж · м/кг².

Указание. Импульс p фотона связан с его энергией E соотношением $pc = E$, где c — скорость света.

$$L = L_0 \frac{1 - \alpha^2}{1 - 2\alpha^2} \approx L_0 \frac{1 - 2\alpha^2}{1 - 2\alpha^2} = L_0, \text{ где } L_0 = 1 \text{ год}, \alpha = \frac{2GM}{Lr^2}$$

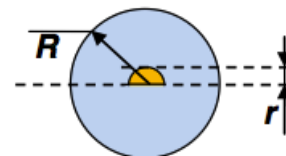
ЗАДАЧА 18. (Всеросс., 2016, финал, 11) Солнечный парус представляет собой плоское зеркало массой $m = 1,660$ г и площадью $S = 1,000$ м². Парус ориентирован перпендикулярно солнечным лучам и движется вдоль линии, проходящей через центр Солнца и центр зеркала. В начальный момент времени оно находится на расстоянии $R_0 = 1$ а. е. от Солнца. На каком расстоянии R_1 от Солнца будет парус через $t_1 = 1$ час полёта, если он двигался с постоянной, но неизвестной скоростью $v \ll c$?

Одна астрономическая единица равна расстоянию от Земли до Солнца: $1 \text{ а. е.} = 150,0 \cdot 10^6$ км. Импульс фотона p и его энергия E связаны соотношением $pc = E$, где $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с — скорость света. Поток испускаемых протонов, нейтронов и других частиц, исходящих от Солнца, не учитывать. Солнечная постоянная $W_0 = 1,367$ кВт/м² — суммарный поток солнечного излучения, проходящий за единицу времени через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно потоку, на расстоянии 1 а. е. от Солнца.

Примечание. Знаете ли вы, что продолжительность года равна $\pi \cdot 10^7$ секунд с точностью полпроцента?

$$R_1 = R_0 \left(1 + \frac{W_0 S t_1}{m c} \right) = 1,000 \cdot 10^3 \cdot \left(1 + \frac{1,367 \cdot 1,000 \cdot 3600}{1,660 \cdot 3 \cdot 10^8} \right) \approx 1,000,78 \text{ а. е.}$$

ЗАДАЧА 19. («Покори Воробьёвы горы!», 2019, 10–11) Однажды в ходе эксперимента д-ру Уилларду было необходимо «подвесить» прозрачный шарик радиусом $R = 1,2$ мкм с массой $m = 10^{-12}$ г. Для этого он решил использовать два встречных лазерных пучка специального сечения — в виде полукруга радиусом $r = 0,2$ мкм (см. рисунок). Они направлялись на шарик с двух сторон по центру шарика точно над его горизонтальным сечением. Показатель преломления вещества шарика $n = 2,5$, отражением света от его поверхности и поглощением света внутри можно пренебречь. Какой должна быть мощность пучков для удержания шарика? Ускорение свободного падения считать равным $g \approx 9,8$ м/с², скорость света $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с. В квантовой теории свет можно рассматривать как поток фотонов — частиц, у которых энергия и импульс связаны соотношением $E = c|\vec{p}|$.



$$P = \frac{3\pi m g c n^2 R}{16(n-1)^2} \approx 18 \text{ мкВт}$$