

Давление света

Задача 1. (МФО, 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.

$$\frac{v}{m_0 c} \approx \frac{2W\tau}{mc^2} = a$$

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.

$$h \cdot 10^4 \cdot 6 \approx \frac{v}{\lambda m} = N$$

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.

$$h \cdot 10^4 \cdot 2 \approx v \cos^2 \alpha \cdot 1 = F$$

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.

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

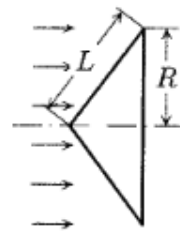
ЗАДАЧА 8. (МФТИ, 1992) На плоскую поверхность тонкой плоско-вогнутой отрицательной линзы нанесено абсолютно отражающее покрытие. На вогнутую поверхность линзы падает узкий пучок импульсного лазерного излучения с энергией $W = 5$ Дж и длительностью импульса $\tau = 10^{-8}$ с. Падающий луч распространяется 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.

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

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.

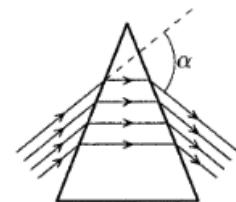


$$N_{\text{отр}} \cdot L \approx \frac{cI^2}{4\pi R^2} = F$$

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.

$$\frac{cNI}{4\pi R^2} = F$$

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.



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

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?

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

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 .

$$\frac{c^2}{\omega} = \omega \Delta : \frac{(m_1 + \hbar\omega)c^2}{L\omega} = s : 0 = \tau_a : \frac{(m_2 + \hbar\omega)c^2}{\omega} = \tau_b$$

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?

$$\left(\frac{cI}{1} - 1 \right) R = \eta \text{ и } \text{высота сегмента шарового сегмента}$$

ЗАДАЧА 16. (*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.

$$L = L_0 \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \approx 2L_0 \frac{\alpha}{1 + \alpha} \approx 2L_0 \alpha, \text{ где } \alpha = \frac{v}{c}, \text{ где } L_0 = \frac{GMm}{r^2}$$

ЗАДАЧА 17. (*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 а. е. = 150,0 · 10⁶ 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?

$$R_1 = R_0 - \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} ct_1 = 0,72 \text{ а. е.}, \text{ где } \alpha = \frac{W_0 S t_1}{2\pi^2 R_0^2 m c}$$