



Овчинкин Владимир Александрович

*Кандидат технических наук,
доцент кафедры общей физики МФТИ,
учитель физики средней физико-математической
школы №5, г. Долгопрудный.*

Давление света

Из электромагнитной теории, развитой в середине XIX века Дж.К. Максвеллом, следует, что электромагнитные волны (в частности, световые волны) обладают механическим импульсом, а значит, способны воздействовать на встречные тела, отражающие и (или) поглощающие их. Этот вывод самого Максвелла, сделанный им в 1873 году, был блестяще подтверждён в тончайших опытах русского физика П.Н. Лебедева. Тончайших потому, что сила воздействия света на тела ничтожна. Например, солнечный свет оказывает на планету Земля воздействие с силой, равной $6 \cdot 10^8$ Н, что в 10^{13} раз меньше силы гравитационного притяжения Солнца и Земли. Дальнейшее развитие физики показало, что световые волны представляют собой поток частиц – квантов света (фотонов), обладающих импульсом. И этот импульс можно измерить, что по существу и было уже сделано Лебедевым в его опытах в 1899–1910 гг. Всему этому и посвящена предлагаемая статья.

Введение

Одним из самых интересных явлений, рассматриваемых в электродинамике, является существование давления электромагнитного излучения на поглощающие и отражающие тела. Гипотеза о световом давлении была впервые высказана немецким учёным Иоганном Кеплером в 1619 году. Кеплер наблюдал образование кометных хвостов, развивающихся по мере приближения кометы к Солнцу. При этом хвосты комет располагались всегда от Солнца. Кеплер высказал предположение, что кометные хвосты представляют собой поток частиц, отбрасываемых действием давления света в сторону от Солнца, когда



комета подходит к нему достаточно близко.

В 1873 г. английский физик Джеймс Клерк Максвелл в рамках созданной им электромагнитной те-

ории предсказал величину светового давления, которая оказалась чрезвычайно малой даже для самых сильных источников света, таких как Солнце или электрическая дуга.

1. Экспериментальное обнаружение давления света

Экспериментальное подтверждение теории и гипотезы Кеплера сделал русский физик П.Н. Лебедев в 1899–1900 гг. при помощи опытов, представляющих собой выдающийся образец экспериментального искусства (именем Петра Николаевича Лебедева назван Физический институт РАН (ФИАН)).

Главной частью прибора Лебедева являлись весьма чувствительные крутильные весы на тонкой кварцевой нити, помещённые в хорошо откачанный баллон. К нити прикреплялись тонкие и лёгкие крылышки (кружки) из платины

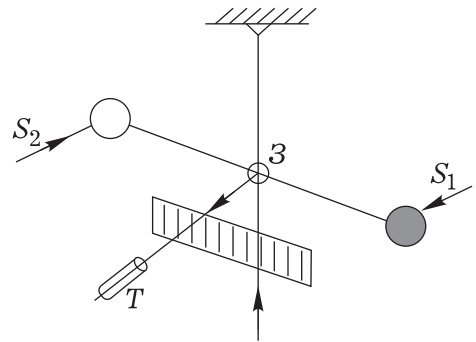


Рис. 1

изображена одна из схем подвеса крылышек на крутильные весы.



или алюминия толщиной от 0,01 до 0,1 мм. Один из кружков был почернён, а другой оставлен блестящим. На рис. 1 показана предельно упрощённая схема опыта, а на рис. 2

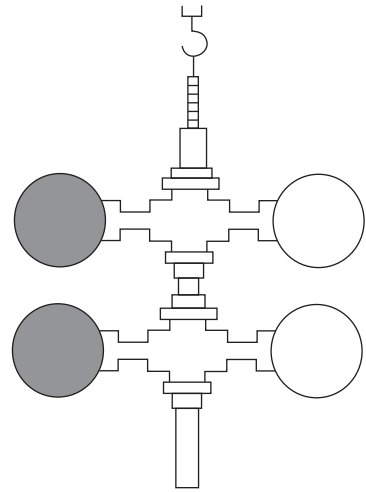


Рис. 2

Свет от мощной дуговой лампы концентрировался при помощи системы линз и зеркал на одном из крылышек и вызывал закручивание подвеса, которое наблюдалось оптическим методом с помощью зрительной трубы T и лёгкого зеркаль-



ца \mathcal{E} , прикрепленного к нити. В приборе Лебедева была предусмотрена возможность освещать крылышки с обеих сторон, изменяя тем самым направление закручивания нити. По измеренному значению угла закручивания можно было вычислить величину светового давления, если были известны интенсивность света и модуль кручения нити. В приборе Лебедева предусматривалась возможность измерения величины падающей энергии.

Главной трудностью в этих опытах является действие конвекционных потоков газа и наличие радиометрического эффекта. Эти помехи могут быть в тысячи раз больше светового давления. Конвекционные потоки закручивают подвес при несколько наклонном положении крылышка. Этот эффект исключался изменением направления освещения.

Радиометрический эффект возникает в разреженном газе вследствие разности температур освещенной и неосвещенной сторон крылышка. Молекулы газа, остающиеся в баллоне, отражаются от более теплой стороны с большей скоростью, и вследствие отдачи крылышки стремятся повернуться

в том же направлении, что и под действием давления света. Этот эффект различен для отражающей и поглощающей пластинок и сильно зависит от их толщины. П.Н. Лебедеву удалось практически исключить радиометрический эффект путем применения тонких пластинок толщиной до 0,02 мм, а также использованием как блестящих, так и зачерненных крылышек. Когда свет направляется на блестящее крылышко, то световое давление примерно вдвое превышает давление света на черное крылышко. Наоборот, радиометрический эффект больше при освещении черного крылышка, поскольку оно сильнее греется. В опытах П.Н. Лебедева удалось реально показать, что световое давление на отражающее крылышко вдвое больше, чем на черное, что доказывает исключение радиометрического эффекта.

Измерения Лебедева дали величину, согласующуюся с теорией Максвелла с точностью до 20%.

Много лет спустя (в 1923 г.) Герлах повторил опыты Лебедева, используя более высокий вакуум. Он довёл точность совпадения с теорией до 2%.

2. Квантовая теория давления света

В квантовой теории световое давление следует интерпретировать как результат передачи импульса фотонов поглощающей или отражающей стенке. Здесь световой поток рассматривается как поток квантов электромагнитной энергии:

$$\varepsilon_{\phi} = h\nu = \hbar\omega, \quad (1)$$

$$h = 2\pi\hbar = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ [Дж} \cdot \text{с]}.$$

Частота света $\nu = \frac{c}{\lambda}$ [Гц], $\omega = 2\pi\nu$ [рад/с] – угловая частота, h и \hbar – постоянные Планка, λ – дли-

на волны света. Сама величина потока энергии в волне Φ [Дж/с = Вт] будет равна

$$\Phi = nh\nu, \quad (2)$$

где n [фотон/с] – поток фотонов в световом пучке. Плотность потока энергии фотонов

$$j = \frac{\Phi}{S} = \frac{nh\nu}{S} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \right]. \quad (3)$$

Так как каждый фотон обладает импульсом $\frac{h\nu}{c}$, то он сообщает поглощающей стенке импульс, равный

$\frac{h\nu}{c}$, а отражающей стенке – им-

пульс вдвое больший: $2\frac{h\nu}{c}$ (по-
скольку при отражении импульс
фотона изменяется от $+\frac{h\nu}{c}$ до $-\frac{h\nu}{c}$,

т. е. на $2\frac{h\nu}{c}$). Таким образом, в соот-
ветствии с (3) импульс, сообщаемый
за 1 с одному m^2 абсолютно погло-
щающей стенке, равен

$$\frac{j}{c} = \frac{nh\nu}{Sc} = \left[\frac{Дж}{m^3} = \frac{Н}{m^2} = Па \right]. \quad (4)$$

Но импульс, сообщаемый за 1 с
одному m^2 поверхности, и есть дав-
ление на эту поверхность. Таким
образом, для абсолютно поглощаю-
щей поверхности

$$p = \frac{j}{c}. \quad (5)$$

В общем случае, когда коэффи-
циент отражения равен R , для дав-
ления получается соотношение:

$$p = (1-R)\frac{j}{c} + R \cdot 2\frac{j}{c} = (1+R)\frac{j}{c}. \quad (6)$$

Таким образом, опыты П.Н. Ле-
бедева показали, что у света есть не
только энергия, но и импульс.

Заметим, что в электродинамике
световое давление объясняется взаи-
модействием магнитного поля элек-
тромагнитной волны и электрическо-
го тока, вызванного электрическим
полем этой же волны, не прибегая
при этом к идее световых квантов.
Любопытные могут ознакомиться с
этим в дополнительном параграфе
«Давление электромагнитной волны».

3. Задачи

Приведём несколько примеров
расчёта светового давления.

Задача 1. На полупрозрачное
зеркало площадью $S = 100 \text{ см}^2$, на-
ходящееся на орбите искусственного
спутника Земли, падают по нормали
солнечные лучи. При этом зеркало
отражает 30% и пропускает 20%
энергии падающего света, а ос-
тальную энергию поглощает. Найти
силу, действующую на зеркало со
стороны света. Расстояние от Зем-
ли до Солнца $R = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$, мощ-
ность излучения Солнца составляет
 $N_C \approx 3,83 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$.

Решение. Плотность потока из-
лучения Солнца (так называемая
солнечная постоянная)

$$j = \frac{N_C}{4\pi R^2} \left[\frac{Вт}{m^2} \right].$$

Ежесекундно на зеркало посту-
пает энергия (поток) $\Phi = jS$. За ма-
лое время Δt на зеркало падает

энергия, равная $\Phi \Delta t = jS \Delta t$. Им-
пульс, переносимый в этом потоке
фотонами, равен

$$P = \frac{\Phi \Delta t}{c} = \frac{N_C S \Delta t}{c \cdot 4\pi R^2}.$$

Второй закон Ньютона в приме-
нении к зеркалу:

$$F = \frac{\Delta P_{\text{зер}}}{\Delta t}.$$

Здесь в соответствии с условием
задачи отражается 30% энергии, а
поглощается 50%, поэтому

$$\Delta P_{\text{зер}} = 0,3 \cdot 2P + 0,5P = 1,1P = 1,1 \frac{N_C S \Delta t}{c \cdot 4\pi R^2}.$$

Таким образом, сила воздействия
света на зеркало

$$F = \frac{\Delta P_{\text{зер}}}{\Delta t} = 1,1 \frac{N_C S}{4\pi R^2 c} = 4,9 \cdot 10^{-8} \text{ Н}.$$

Задача 2. Мощность точечного
монохроматического источника света
на длине волны $\lambda = 500 \text{ нм}$ состав-
ляет $N_0 = 10 \text{ Вт}$. На каком макси-
мальном расстоянии этот источник

будет замечен человеком, если глаз реагирует на световой поток $n \geq 60$ фотонов в 1 с? Диаметр зрачка $d_{зр} = 0,5$ см.

Решение. Точечный источник света излучает во всё его окружающее пространство, т. е. в телесный угол 4π стерадиан. Зрачок человеческого глаза воспринимает лишь ничтожную часть этого потока. Из точки расположения источника (рис. 3) с расстояния L зрачок «виден» под телесным углом

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha),$$

где α – угол образующей конуса. Поскольку угол α крайне мал, то

$$1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha^2}{2}.$$

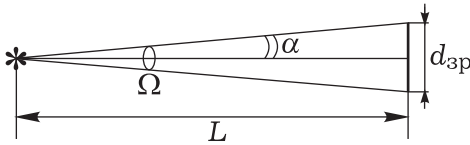


Рис. 3

Отсюда телесный угол

$$\Omega \approx \pi \alpha^2 = \frac{\pi (d_{зр})^2}{4L^2},$$

где $\alpha = \frac{d_{зр}}{2L}$.

Мощность светового потока, падающего в глаз:

$$N_{гл} = \frac{N_0}{4\pi} \Omega = \frac{N_0 (d_{зр})^2}{16L^2}.$$

Поток фотонов, попадающих в глаз:

$$n = \frac{N_{гл}}{h\nu} = \frac{N_{гл} \lambda}{hc} \geq n_0.$$

Из этого неравенства и определяем максимальное расстояние

$$L \leq \frac{d_{зр}}{4} \sqrt{\frac{N_0 \lambda}{n_0 hc}} \approx 8 \cdot 10^6 \text{ м} = 8000 \text{ км}.$$

Задача 3. Допустим, что небольшой космический корабль, масса которого вместе с экипажем равна

$M = 1460$ кг, оказался в космическом пространстве, где гравитационным полем можно пренебречь. Какую скорость приобретёт корабль, если на нём установить прожектор, излучающий в пространство мощность $N = 10^4$ Вт в течение одних земных суток?

Решение. Здесь можно и нужно воспользоваться законом сохранения импульса. Импульс излучённых за



сутки фотонов $\frac{Nt}{c}$ равен изменению импульса корабля Mv :

$$\frac{Nt}{c} = Mv,$$

откуда $\frac{Nt}{Mc} = 1,97 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 2 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$.

Вот если бы вся излучаемая энергия перешла каким-то образом в кинетическую энергию корабля, то в этом случае мы получили бы

$$v = \sqrt{\frac{2Nt}{M}} \approx 1,1 \text{ км/с},$$

что не так уж и мало.

4. Упражнения

1. Космический корабль, находящийся на расстоянии $L = 0,7 \cdot 10^8$ км от Солнца, раскрывает солнечный парус площадью 100 км^2 . Чему равна максимально возможная сила давления света на идеально отражающую поверхность паруса? Мощность, излучаемая Солнцем, $N = 3,83 \cdot 10^{26}$ Вт.

2. Призма (рис. 4) отклоняет параллельный пучок монохроматического 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.

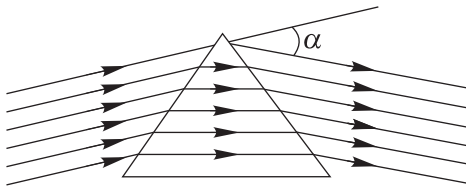


Рис. 4

3. Кусочек металлической фольги массой $m = 1$ мг освещается лазерным импульсом мощностью $N = 15$ Вт и длительностью $\tau = 0,5$ с. При этом угол падения светового потока $\alpha = 60^\circ$. Пластика фольги пропускает 40% энергии падающего излучения, а остальную зеркально отражает. Найти скорость, приобретенную фольгой в результате воздействия света.

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

Ответы

$$1. F = \frac{NS}{2\pi L^2 c} = 4,15 \text{ кН.}$$

$$2. F = \frac{N}{c} \sqrt{2(1 - \cos \alpha)} = 0,67 \cdot 10^{-7} \text{ Н.}$$

$$3. v = \frac{N\tau}{mc} \sqrt{1 + 0,36 - 2 \cdot 0,6 \cos \alpha} \approx$$

$$\approx 2,2 \text{ см/с.}$$

4. Если импульс падающего света равен W/c , а прошедшего линзу $W/2c$, $\alpha = 45^\circ$, то

$$f = \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{c\tau} \sqrt{5 - 2\sqrt{2}} \approx 1 \text{ Н.}$$

5. Давление электромагнитной волны

Сначала рассмотрим один из частных случаев этого явления. Пусть плоская электромагнитная волна падает по нормали на слабо проводящую среду, на границе которой совершенно отсутствует отражение, т. е. 100% падающего излучения поглощается в этой среде. В этом случае диэлектрическая проницаемость ϵ такой среды близка к еди-

нице. Так и будем считать, что $\epsilon \approx 1$. Конечно, и магнитная проницаемость этой среды $\mu \approx 1$.

Объёмная плотность электромагнитной энергии в этой волне $w_{\text{эм}}$ [Дж/м³] складывается из объёмных плотностей электрического $w_{\text{эл}}$ и магнитного $w_{\text{м}}$ полей \vec{E} и \vec{B}



в этой волне:

$$w_{эм} = w_{эл} + w_M = \frac{E^2}{k \cdot 8\pi} + \frac{B^2}{k' \cdot 8\pi} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0}. \quad (7)$$

Здесь под размерными коэффициентами СИ понимаются:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}, \quad (8)$$

$$k' = \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \text{ Гн/м},$$

$$\frac{k}{k'} = 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = c^2 = \frac{1}{\epsilon_0\mu_0},$$

где $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Обратим внимание также на то, что размерность плотности энергии Дж/м³ соответствует размерности давления Н/м², так как Дж = Н·м. Поскольку в линейно поляризованной (плоской) волне поля \vec{E} и \vec{B} распределены по синусоидальному закону с амплитудными значениями E_0 и B_0 (рис. 5), то легко найти среднее по времени значение плотности электромагнитной энергии в этой волне.

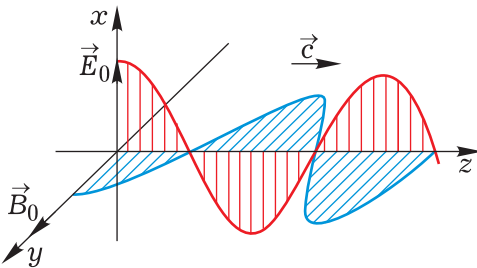


Рис. 5

Среднее значение за период колебаний $\overline{\cos^2 \omega t} = \frac{1}{2}$. Поэтому очевидно, что

$$\bar{w}_{эм} = \frac{\epsilon_0 E_0^2}{4} + \frac{B_0^2}{4\mu_0}. \quad (9)$$

Если при этом учесть соотношения (8), а также то, что в рассмат-

риваемой (поглощающей) среде $\epsilon \approx \mu \approx 1$, получаем связь между амплитудами полей E_0 и B_0 в волне:

$$E_0 = cB_0. \quad (10)$$

Отсюда среднее значение плотности энергии в волне

$$\bar{w}_{эм} = \frac{E_0^2}{k \cdot 8\pi} = \frac{\epsilon_0 E_0^2}{2} = \frac{B_0^2}{k' \cdot 8\pi} = \frac{B_0^2}{2\mu_0} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right]. \quad (11)$$

Итак, описываемая волна падает на плоскую границу (плоскость $z=0$, рис. 6)

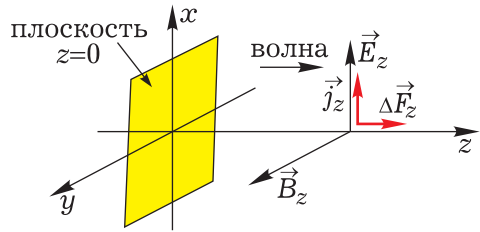


Рис. 6

поглощающего тела (среды). Сама среда размещается в части пространства при $z \geq 0$. Под воздействием электрического поля волны \vec{E} в среде возникает электрический ток, плотность которого равна \vec{j} . Вектор \vec{j} в соответствии с законом Ома направлен так же, как и вектор напряжённости электрического поля \vec{E} :

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho}, \quad (12)$$

где ρ – удельное сопротивление слабо проводящей среды. Заметим, что соотношение (12) сразу же следует из выражения $I = U/R$, если левую и правую части поделить на сечение проводника S и учесть, что $R = \rho \frac{l}{S}$ и $E = \frac{U}{l}$.

Рассмотрим этот ток в плоскости z ($z > 0$). Магнитная индукция волны в этой плоскости имеет значение

\vec{B}_z , и вектор этого поля перпендикулярен направлению \vec{j}_z – плотности тока. Результатом взаимодействия тока \vec{j}_z и поля \vec{B}_z является сила Ампера $\Delta\vec{F}_z$, направленная в соответствии с правилом левой руки вглубь вещества (рис. 6). Величина этой силы

$$\Delta F_z = IB_z \Delta z = j_z S B_z \Delta z,$$

где S – площадь поверхности вещества, Δz – толщина слоя, в котором возникает ток I , и можно считать ΔF_z , j_z и B_z одинаковыми по всей толщине Δz . Давление этой силы

$$\Delta p_z = \frac{\Delta F_z}{S} = j_z B_z \Delta z. \quad (13)$$

Полное давление на среду p представляет собой сумму (интеграл) этих вкладов (7), т. е.

$$\bar{p} = \sum_z \overline{j_z B_z} \Delta z.$$

Можно строго доказать, что эта сумма равна средней плотности энергии падающей на среду волны:

$$p \equiv \bar{p} = \bar{w}_{\text{эм}} = \frac{\varepsilon_0 E_0^2}{2} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right]. \quad (14)$$

Другим примером, также иллюстрирующим механизм давления, является отражение волн от поверхности идеального проводника. В этом случае магнитное поле действует на поверхностный ток, возбуждаемый волной в тонком поверхностном слое. Расчёт для этого случая даёт такое значение давления:

$$p = 2\bar{w}_{\text{эм}} = \varepsilon_0 E_0^2. \quad (15)$$

Для произвольного случая, когда поверхность тела имеет коэффициент отражения по энергии падающей волны R (при полном поглощении $R=0$, а при полном отражении $R=1$) давление на поверхность определится так:

$$p = (1-R)\bar{w}_{\text{эм}} + R \cdot 2\bar{w}_{\text{эм}} = (1+R)\bar{w}_{\text{эм}}. \quad (16)$$

При внимательном рассмотрении формулы (16) можно заметить её сходство с формулой (6), полученной с помощью квантового подхода. Это является закономерным: применительно к свету квантовая и электродинамическая теории должны давать одинаковые результаты.

Новости Новости Новости Новости Новости

Число экзопланет всё увеличивается

В прошлом веке, т. е. совсем недавно по астрономическим масштабам, учёные открыли экзопланеты – планеты, расположенные за пределами Солнечной системы. Это открытие не перестаёт удивлять нас до сих пор, ведь очень удалены от Земли звёзды, вокруг которых обращаются эти планеты. И только прогресс технических средств наблюдения позволяет зафиксировать существование планет у некоторых звёзд Галактики. В январе этого года на конференции Американского астрономического общества было сообщено об открытии с помощью высокочувствительного спектрометра телескопа «Кека I», находящегося на вершине потухшего гавайского вулкана Мауна Кеа, относительно небольшой и лёгкой (лишь в 4 раза тяжелее Земли) экзопланеты у звезды HD 156668 в направлении созвездия Геркулес. Так что количество известных астрономам экзопланет пополнилось и достигло уже 424. Новая планета находится от Земли на расстоянии 80 световых лет и делает оборот вокруг своей звезды за 4 дня.