

ДАВЛЕНИЕ СВЕТА НА ЗЕРКАЛО, ПОГРУЖЁННОЕ В ПРЕЛОМЛЯЮЩУЮ СРЕДУ

Огромная роль, которую сыграло в развитии физики открытие пондеромоторных действий света, общеизвестна. Классические работы П. Н. Лебедева показали, что электромагнитные волны обладают импульсом, а исследования С. А. Садовского установили наличие у них собственного (спинового) момента импульса. Эти фундаментальнейшие открытия легли, по существу, в основу тех идей, с которыми связано возникновение фотонных представлений о свете, а позднее и боровской модели атома. Однако опыты П. Н. Лебедева, так же как и последующие прямые и косвенные измерения пондеромоторных действий света, относились к случаю распространения электромагнитных волн в вакууме. Вопрос о влиянии среды на давление света долгое время оставался экспериментально невыясненным. Между тем теория предсказывала, что это давление должно быть пропорционально показателю преломления среды. В самом деле, плотность

*) L a n n u i e r, *Astronomie*, 67, Oct., 351—371 (1953).

импульса электромагнитной волны, распространяющейся в среде, определяется выражением¹

$$g = \frac{1}{4\pi c} [DB], \quad (1)$$

и, следовательно, давление света на погружённое в среду зеркало должно быть равно

$$p = gv(1+R)\cos^2\varphi, \quad (2)$$

где v — скорость света в среде, R — коэффициент отражения зеркала в среде и φ — угол падения света на зеркало*).

Учитывая, что для изотропной непоглощающей среды с показателем преломления n

$$\mathbf{D} = n^2\mathbf{E} \quad \text{и} \quad \mathbf{B} = \mathbf{H},$$

имеем:

$$p = \frac{n^2v}{c^2}(1+R)S\cos^2\varphi, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} [\mathbf{E}\mathbf{H}] \quad (4)$$

— вектор Умова-Пойнтинга в среде. Если среда обладает дисперсией и облучающий пучок немонахроматичен, то

$$p = \frac{\cos^2\varphi}{c^2} \int_0^\infty n_\lambda^2 v_\lambda S_\lambda (1+R_\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

Как утверждает автор, строгий расчёт показывает, что под v следует понимать не групповую, а фазовую скорость света в среде. Приняв это утверждение и полагая, что R слабо зависит от λ , уравнение (5) можно переписать в виде

$$p = \frac{\cos^2\varphi}{c} I(1+R)\bar{n}^{***}, \quad (6)$$

где

$$I = \int_0^\infty S_\lambda d\lambda \quad \text{и} \quad \bar{n} = \int_0^\infty n_\lambda S_\lambda d\lambda.$$

*) Элементарные фотонные представления приводят согласно (2) к выводу, что импульс единичного фотона в среде должен быть равен $\frac{h}{\lambda}$ (т. е. $\frac{h\nu}{v}$ вместо $\frac{h\nu}{c}$ для вакуума).

**) Любопытно отметить, что пропорциональность давления света показателю преломления среды непосредственно следует и из ньютоновских корпускулярных представлений о свете (скорость в среде больше, чем в вакууме).

Мы уже сообщали ²*) о предварительных результатах опытов Джонса ³ показавших, что давление света на зеркало, погружённое в среду, пропорционально её показателю преломления. Ныне опубликовано подробное описание более тщательно выполненных последующих опытов, в которых была достигнута значительно бóльшая точность. Ввиду большой принципиальной важности вопроса о давлении света в среде представляется целесообразным вновь вернуться к этому вопросу и познакомить читателя с некоторыми подробностями эксперимента.

Как и обычно, метод измерений состоял в облучении зеркальных крылышек, укрепленных на унифилярном подвесе, и определении вращающего момента, создаваемого световым давлением. Однако для определения зависимости p от n подвес с крылышками должен был погружаться в жидкость, что создавало ряд существенных затруднений. В отличие от измерений в вакууме основной источник помех связан с неизбежным возникновением конвекционных токов ^{**}), могущих вызывать добавочный вращающий момент двоякого рода: а) вследствие несимметричности крылышек, находящихся в конвекционном потоке, и б) вследствие различия температур (а следовательно, и конвекционных скоростей) у освещённой и неосвещённой сторон крылышка. Уменьшение этих эффектов достигалось путём а) изготовления крылышек из хорошо отражающего материала с большой теплопроводностью, б) замены прерывистого их облучения непрерывным, но с периодическим смещением освещающего луча по поверхности крылышка, в) тщательной установки крылышка в подвесе, г) уменьшения размеров сосуда, заключающего подвес, и л) уменьшения времени отклика механической системы (учитывая инерционность тепловых эффектов).

Сосуд, в котором производились измерения, представлял собой вертикальную толстостенную бронзовую трубку, внутренний диаметр которой равнялся 0,8 см, снабжённую двумя парами стеклянных окошек (толщиной 0,1 см). Трубка заполнялась жидкостью примерно до половины. На натянутом (для исключения влияния поверхностных сил) унифилярном подвесе (полоска сплава золота сечением $0,005 \times 0,0005$ см) укреплялась тонкая медная проволочка, несущая крылышки. Крылышки представляли собой прямоугольное серебряное зеркальце ($0,2 \times 0,5 \times 0,01$ см), покрытое родием во избежание коррозии и привязанное к медной проволочке обычным морским узлом. (Другие способы крепления — приклейка, пайка — оказались несравненно менее удобными.) На той же проволочке, несколько выше (оставаясь в воздухе при погружении крылышек в жидкость) помещалось второе зеркальце ($0,2 \times 0,5 \times 0,02$ см), служившее для отсчёта угла поворота подвеса. Наконец, ещё выше к проволочке был привязан слабый магнетик длиной 0,2 см и диаметром 0,03 см, находившийся в поле электромагнита, помещённого снаружи трубки. Эта магнитная система служила одновременно как для калибрования и контроля чувствительности подвеса, так и для его добавочного успокоения.

Отсчёт угла поворота подвеса производился по смещению светового зайчика, отражённого от верхнего зеркальца. Ввиду малости углов поворота была использована схема оптического усиления, обеспечивающая достаточную стабильность отсчётов; смещение нуля за час не превышало 10^{-8} радиана (т. е. примерно 1% величины смещений, соответствующих броуновскому движению подвеса), что позволяло все наблюдаемые особенности регистрrogramмы уверенно интерпретировать как движения подвеса.

Отрицательная обратная связь между оптическим усилителем и контрольной магнитной системой успокаивала систему и уменьшала время её отклика с 0,7 сек. до 0,5 сек. Линейность отклика соответствовала точ-

*) В ² в формуле (3) ошибочно в знаменателе поставлено 4π.

***) Радиометрический эффект в жидкости практически отсутствует.

ности $\pm 0,1\%$; учитывая же все возможные источники ошибок, погрешность определения положения подвеса составляла $\pm 0,3\%$.

В качестве источника света для облучения крылышек использовалась вольфрамовая лампа накаливания 12 в, 48 вт, работавшая в режиме сильной недогрузки: 9,8 в, 30 вт. Система зеркал и линз создавала на крылышке два изображения источника света, располагавшиеся одно на передней, другое — на задней его поверхности на различном расстоянии от оси вращения (положения AA'). В результате светового давления возникла пара сил, стремившаяся повернуть подвес, причём момент пары зависел как от интенсивности света, так и от взаимного расположения изображений.

Простым поворотом профильных диафрагирующих дисков оба изображения могли быть перемещены по поверхности крылышка так, что момент пары, оставаясь тем же по величине, менял знак на обратный (положения BB'). Профильные диафрагмы были насажены на ось, вращаемую мотором. Таким образом, имелась возможность периодически менять знак момента пары с произвольной частотой (переноса лучи из положений AA' в положения BB' и обратно).

Предварительные измерения, проведённые с сосудом, заполненным воздухом, показали, что при освещении крылышек в течение первых ~ 10 сек. происходит процесс постепенного установления равновесного положения подвеса, причём величина и направление смещения зависят от устройства подвеса, но практически (при аккуратной юстировке) не зависят от положения пучков (AA' или BB'). Перемещение пучков создавало добавочный сдвиг, не сопровождавшийся (с точностью до 1%) появлением моментов конвекционного происхождения (как показали контрольные опыты с созданием пары сил при помощи электромагнита).

Оценки показали, что при разведении пучков на $0,3$ мм, вращающий момент должен был быть близок к $1,3 \cdot 10^{-6}$ дин·см, что соответствовало повороту подвеса на $4 \cdot 10^{-5}$ радиана. Наблюдаемые значения лежали между $3 \cdot 10^{-5}$ и $6 \cdot 10^{-5}$ радиана. Оценка броуновских шумов привела к значению 10^{-6} радиана, т. е. около 2% измеряемой величины. В действительности шумы нередко достигали 5% .

При погружении подвеса в жидкость картина существенно менялась. После установления равновесного отклонения перемещение пучков влекло за собой первоначально быстрый отброс (в течение долей секунды), за которым следовало сравнительно медленное возвращение почти до прежнего положения равновесия (5—7 сек.), сменявшееся вновь перемещением в первоначальном направлении и постепенным установлением нового положения равновесия, причём равновесное смещение было примерно вдвое больше первоначального отброса. Авторы объяснили такую картину влиянием конвекции и в результате подробного анализа пришли к выводу, что первоначальный отброс соответствует истинной величине светового давления. Поэтому они прибегли к быстрому периодическому перемещению пучков туда и обратно (50—70 раз в минуту путём вращения фигурных диафрагм), полагая, что таким путём влияние конвекционных сил исключается.

Контрольные опыты с созданием переменной пары сил при помощи электромагнита подтвердили законность такого приёма, причём влияние конвекционных сил было оценено как меньшее $0,2\%$ от измеряемого эффекта.

Окончательные измерения велись следующим образом. Первоначально подвес находился в воздухе. Прикладывалась калибровочная пара сил, создаваемая электромагнитом и примерно равная ожидаемой в результате переключения световых пучков, и измерялся отброс. Затем измерялся

Жидкость	Вода	Этилов. спирт	Четырёх-хлорист. углерод	Ксилол	Бензол	Серо-углерод	Оценка случайных ошибок в \pm % (сред.)
Поправки							
Поглощение света в жидкости	0,972	0,983	0,998	0,994	0,992	0,997	0,1
Объёмное давление в жидкости	1,002	1,001	1,000	1,000	1,000	1,000	0,1
Отражение от окошка	1,033	1,034	1,038	1,038	1,038	1,037	0,1
Многokратные отражения	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,5
Отражение от крылышка	0,957	0,953	0,944	0,940	0,940	0,932	0,3
Угол падения	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	0,1
Изменение положения пучков	0,990	0,989	0,986	0,986	0,936	0,984	0,2
Полная поправка	0,950	0,956	0,962	0,954	0,952	0,946	0,7
Результаты измерений							
Количество серий измерений	7	9	6	5	4	8	—
Количество отдельных измерений отноше- ния давлений (жидкость/воздух)	440	1120	240	400	440	520	—
«Опытное» значение отношения давлений (погрешность указана в %)	1,247 ($\pm 1,1$)	1,305 ($\pm 0,3$)	1,413 ($\pm 0,3$)	1,424 ($\pm 1,0$)	1,432 ($\pm 0,6$)	1,539 ($\pm 1,5$)	0,9
Исправленное значение отнош. давлений	1,341	1,365	1,469	1,493	1,504	1,627	1,2
Средний показатель преломления	1,329	1,358	1,457	1,489	1,493	1,613	0,1
Различие в %	+0,9	+0,5	+0,8	+0,3	+0,7	+0,9	—

отброс, вызываемый световым давлением. После этого сосуд заполнялся жидкостью и опыт повторялся.

Таким образом, момент, создаваемый световым давлением, сопоставлялся (и в жидкости и в воздухе) с постоянным калибровочным моментом.

В результате находилось «опытное» отношение давления света в жидкости к давлению света в воздухе. Оценка ошибок показала, что точность определения этого отношения в единичном опыте порядка $\pm 1,5\%$.

Затем вводились поправки:

1. На поглощение света в жидкости. На пути луча помещалась кювета с водой, выполнявшая роль светофильтра и ограничивавшая пучок интервалом длин волн от 0,4 до 1,2 μ с максимумом около 0,8 μ . Поглощение в жидкостях измерялось интегрально при помощи серносвинцового фотоэлемента и вводилась поправка на ослабление светового пучка. Кроме ослабления освещающего пучка, поглощение вело к появлению объёмных сил давления в жидкости, которые также учитывались.

2. На зависимость отражательной способности стеклянного окошка от показателя преломления жидкости. Эта поправка определялась путём измерения прозрачности окошка, погружаемого в бензол (поглощение в стекле), и окошка, находящегося в воздухе, а затем использования формул Френеля для учёта влияния показателя преломления жидкости.

Кроме того, расчётом оценивалась поправка на многократные отражения.

3. На зависимость коэффициента отражения R от n — путём прямых измерений этой зависимости (но без учёта слабого диффузного отражения).

4. На изменение положения светового пучка на крылышке и угла его падения — путём приближённых теоретических оценок.

Все эти поправки приведены в таблице в виде поправочных множителей.

Средний показатель преломления \bar{n} рассчитывался путём измерения n_λ для различных λ и графического вычисления $\int n_\lambda I_\lambda d\lambda$ по известной спектральной характеристике источника света. (Оказалось, что \bar{n} практически равнялось n при $\lambda = 0,8 \mu$.) Результаты измерений сведены в таблицу, охватывающую данные, полученные в течение 6 месяцев для шести различных жидкостей. Как видно из таблицы, имеет место превосходное соответствие между результатами опытов и теоретической формулой (6), причём средняя ошибка измерений не превышает $\pm 1,2\%$.

Авторы отмечают, что в случае сероуглерода групповая скорость света при $\lambda = 0,8 \mu$ примерно на 3% меньше фазовой, и что, несмотря на малость этой величины, опыт, повидимому, свидетельствует в пользу высказанного ими утверждения, что в формуле (3) v означает не групповую, а фазовую скорость.

Г. Розенберг

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. И. Е. Тамм, Основы теории электричества, Гостехиздат, 1949.
2. Г. Розенберг, УФН 44, № 3, 463 (1951).
3. R. V. Jones, Nature 167, 439 (1951).
4. R. V. Jones and J. C. S. Richards, Proc. Roy. Soc. 221A, № 1147, 480 (1954).