

-1 Опыт Физо

Условие

Задача 9-1 Опыт Физо.

Впервые измерить скорость света в земных условиях удалось французскому физику Физо в 1848 году. Данная задача посвящена теоретическому описанию этого знаменитого эксперимента.

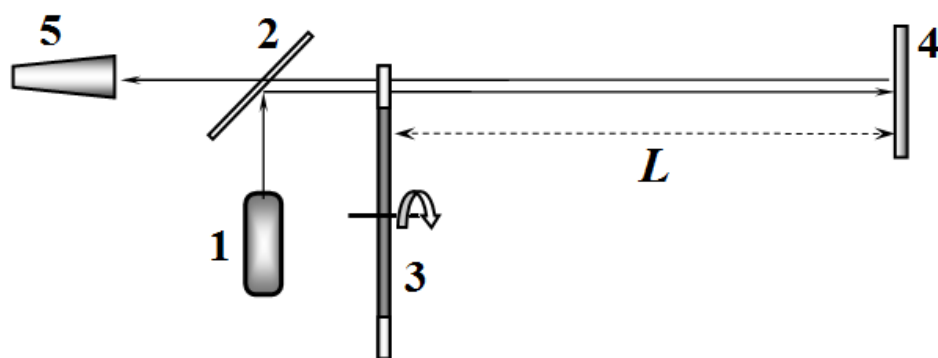
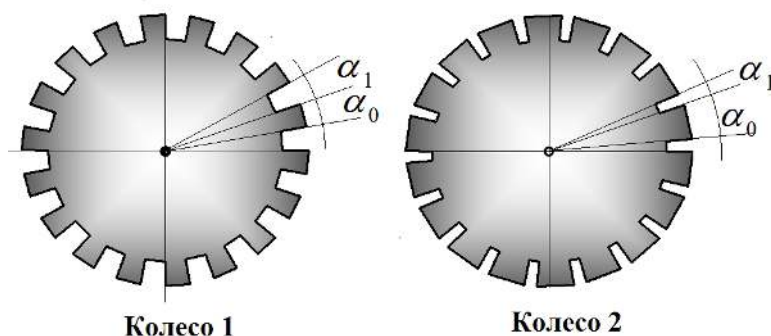


Рис. 1

Схема установки Физо представлена на рис. 1. Узкий пучок света от мощного источника 1 направляется на полу прозрачное зеркало 2 отраженный от него луч проходит между зубцами быстро вращающегося зубчатого колеса 3 и направляется на удаленное зеркало 4. Расстояние от колеса до зеркала равно L . Отраженный от зеркала свет опять проходит между зубцами вращающегося зубчатого колеса и наблюдается с помощью зрительной трубы 5.



Зубчатое колесо имеет N одинаковых зубьев. На рис. 2 показаны два типа зубьев. На колесе 1 угловые размеры выступов и выемок одинаковы

$$\alpha_1 = \alpha_0.$$

На колесе 2 угловой размер выемки в два раза меньше углового размера выступа

$$\alpha_1 = \frac{1}{2}\alpha_0.$$

Рис. 2

При наблюдении отраженного света при определенных частотах вращения колеса отраженный свет периодически исчезал.

1. Качественно объясните, почему при некоторых частотах вращения отраженный свет переставал быть виден.
2. Постройте графики зависимости средней интенсивности видимого света от частоты вращения колеса n (n - число оборотов колеса в секунду) для колеса 1 и колеса 2. Укажите, при каких частотах вращения средняя интенсивность прошедшего света будет максимальна, а при каких минимальна.
3. В реальном эксперименте Физо использовал колесо типа 1 содержащее $N = 720$ зубьев (изобразить такое число зубьев на маленьком рисунке нам не удалось), расстояние до зеркала равнялось $L = 8,63$ км (эксперимент проводился в горах зеркало располагалось на соседней горе). При увеличении скорости вращения колеса первое прерывание света наблюдалось при $n = 12,5\text{с}^{-1}$ (оборотов в секунду). Определите по этим данным скорость света.

Решение

Задача 9-1 Опыт Физо.

1. Свет распространяется не мгновенно, а с конечной (хотя и очень большой) скоростью. Зубчатое колесо разбивает световой поток на отдельные «порции» - импульсы. Если за время движения светового импульса от колеса до зеркала и обратно, колесо успеет повернуться на угол одного зубца, то он не сможет пройти через колесо.
2. Рассмотрим сначала прохождение света через колесо типа 1, в котором размеры зубцов и выемок одинаковы. Свет, проходящий через вращающееся колесо, разбивается на импульсы, длительность которых равна

$$\tau = \frac{T}{2N} = \frac{1}{2Nn}. \quad (1)$$

Промежуток времени между импульсами также равен τ . Эти импульсы возвращаются обратно через время, которое требуется свету для преодоления расстояния от колеса до зеркала и обратно,

$$t_0 = \frac{2L}{c}. \quad (2)$$

На рис. 2 показаны временные диаграммы импульсов, уходящих от колеса (сплошная заливка) и возвращающихся от зеркала (квадратная штриховка). Области их перекрытия определяют промежутки времени, когда возвращающийся свет проходит между зубьев и попадает к наблюдателю. Из рис. 2а видно, что при $t_0 < \tau$ интервал времени, в котором свет виден, равен $(\tau - t_0)$. Очевидно, что средняя интенсивность пропорциональна промежутку времени в течение, которого свет доходит до наблюдателя. Поэтому в данном случае эта интенсивность оказывается равной

$$\bar{I} = I_0 \frac{\tau - t_0}{2\tau} = \frac{I_0}{2} \left(1 - \frac{4NL}{c} n \right), \quad (3)$$

где I_0 - интенсивность наблюдаемого света при неподвижном колесе. То есть линейно убывает с ростом частоты вращения. При $t_0 = \tau$ средняя интенсивность прошедшего света становится равно нулю (см. рис 2б). При $t_0 > \tau$ возвращающийся импульс начинает попадать в следующий вырез. На этом интервале средняя интенсивность описывается формулой

$$\bar{I} = I_0 \frac{t_0 - \tau}{2\tau} = \frac{I_0}{2} \left(\frac{4NL}{c} n - 1 \right), \quad (4)$$

Т.е. линейно возрастает с ростом частоты вращения. Этот рост будет продолжаться до тех пор, пока $t_0 < 2\tau$. При дальнейшем росте частоты вращения зависимость будет периодически повторяться. График этой зависимости показан на рис. 2д, на котором n_1 - частота при которой наступает первое полное затемнение. Эта частота может быть найдена из выражения (3):

$$n_1 = \frac{c}{4NL}. \quad (2)$$

Отметим, что все полные затемнения наступают тогда, когда время распространения светового импульса оказывается равным времени поворота колеса на «полуцелое» число зубьев, т.е.

$$t_0 = (2k + 1)\tau \Rightarrow n_{\min} = (2k + 1)n_1 = (2k + 1) \frac{c}{4NL}. \quad (3)$$

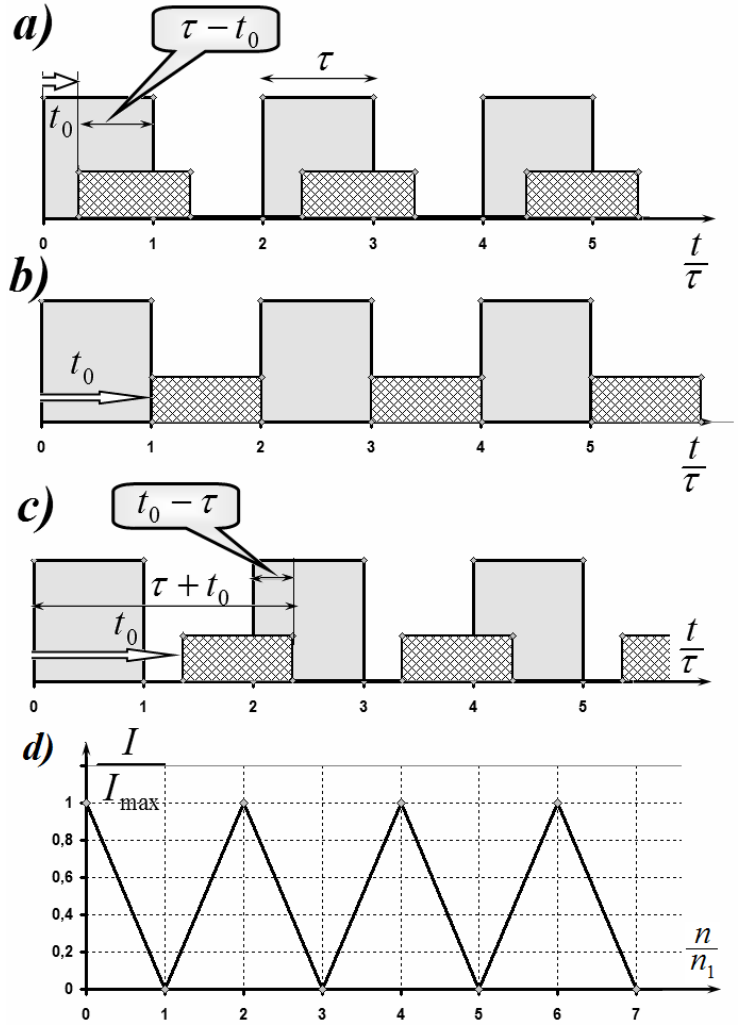


Рис. 2

здесь $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Максимумы средних интенсивностей наблюдаются при

$$t_0 = 2k\tau \Rightarrow n_{\min} = 2kn_1 = 2k \frac{c}{4NL}. \quad (4)$$

Анализ зависимости средней интенсивности прошедшего света для установки с колесом 2 может быть проведен аналогично.

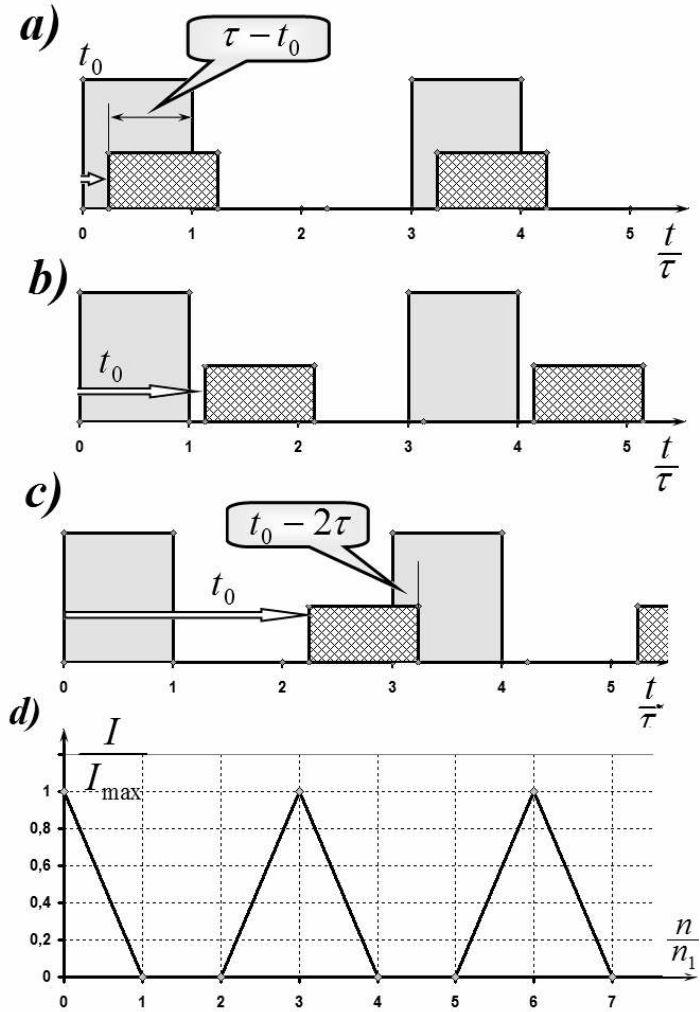


Рис. 3

На рис. 3 показаны такие же, как и на рис. 2, временные диаграммы выходящих после колеса импульсов и импульсов, возвращающихся с задержкой t_0 . В этом случае интервал τ равен времени в течении которого колесо поворачивается на угол соответствующий повороту на один вырез, т.е.

$$\tau = \frac{1}{3} \frac{T}{N} = \frac{1}{3Nn}. \quad (5)$$

Зависимость средней интенсивности регистрируемого света от времени описывается формулами

$$\bar{I} = \frac{I_0}{3} \frac{\tau - t_0}{\tau} = \frac{I_0}{3} \left(1 - \frac{6LN}{c} n \right), \quad n < \frac{c}{6LN}$$

$$\bar{I} = 0, \quad \frac{c}{6LN} < n < 2 \frac{c}{6LN}$$

$$\bar{I} = \frac{I_0}{3} \left(\frac{6LN}{c} n - 2 \right), \quad n > 2 \frac{c}{6LN}$$

В этом случае максимальная средняя интенсивность наблюдается при

$$n = 3kn_1 = 3k \frac{c}{6LN}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

3. Из формулы (3) следует, что скорость света может быть выражена следующим образом через параметры системы и результаты измерения

$$n_1 = \frac{c}{4NL} \Rightarrow c = 4NLn_1 = 4 \cdot 720 \cdot 8,63 \cdot 10^3 \cdot 12,5 = 3,10 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (5)$$