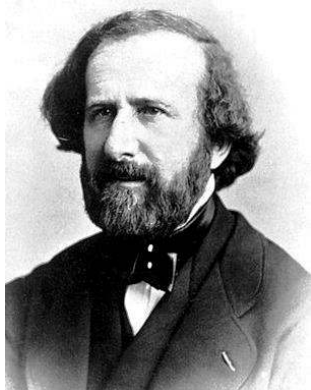


Условие

Задача 2. Опыт Физо



Весь XIX век физики были убеждены, что свет есть волна, распространяющаяся в особой среде – эфире. Практически все известные оптические явления нашли свое объяснение в рамках теории светоносного эфира. Одним из самых интересных и сложных вопросов являлся вопрос о взаимодействии материальных тел и светоносного эфира. В частности, как ведет себя эфир в движущемся теле: остается в покое; движется вместе с телом; или как-то по-иному. Один из решающих экспериментов в исследовании этого явления провел французский физик Арман Ипполит Луи Физо. Результаты этого опыта были опубликованы в 1859 году в работе «О гипотезах относительно светового эфира и об одном эксперименте, который, по-видимому, показывает, что движение тел меняет скорость, с которой свет распространяется внутри этих тел». Все численные результаты, использованные в этой задаче, взяты из названной статьи И. Физо.

Скорость света в вакууме считать равной $c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, Значения длин волн приведены для волн в вакууме. Показатель преломления воды $n = 1,33$

Прежде чем приступить к анализу эксперимента И. Физо, вспомним основные положения теории интерференции света.

Часть 1. Воспоминание об интерференции.

Наиболее простой для теоретического описания интерференции света является оптическая схема, предложенная английским физиком Т. Юнгом (рис. 1). Монохроматический свет падает нормально на непрозрачную пластинку, в которой на небольшом расстоянии проделаны два маленьких отверстия S_1 и S_2 , которые можно рассматривать как два когерентных точечных источника света. На большом расстоянии от этой пластинки расположен экран, на котором наблюдается интерференционная картина в виде системы параллельных равноотстоящих светлых и темных полос.

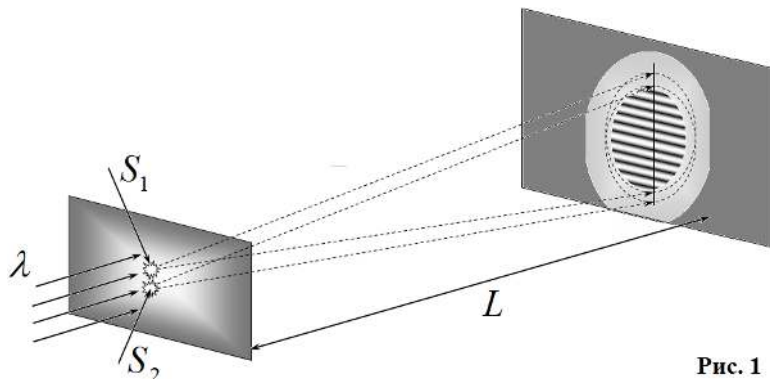


Рис. 1

Рассмотрим описанную установку со следующими параметрами: Расстояние между отвер-

стями $d = 1,0$ мм; расстояние до экрана $L = 2,0$ м, длина волны света $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-6}$ м. (рис. 2)

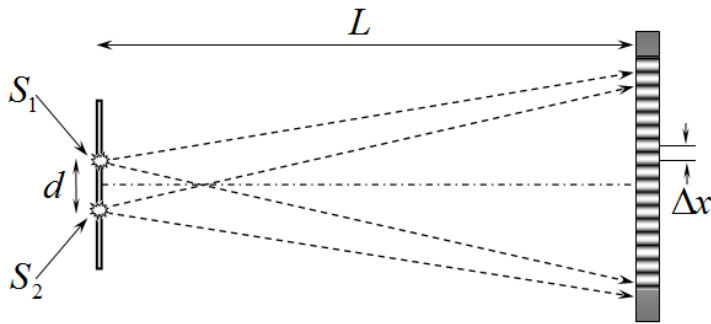


Рис. 2

1.1 Рассчитайте ширину интерференционной полосы Δx (расстояние между соседними максимумами) на экране.

Отверстие S_1 закрывают плоскопараллельной стеклянной пластинкой P (рис.3), толщина которой $h = 5,0 \cdot 10^{-6}$ м, а показатель преломления $n = 1,6$. При такой малой толщине можно пренебречь смещением лучей в пластинке.

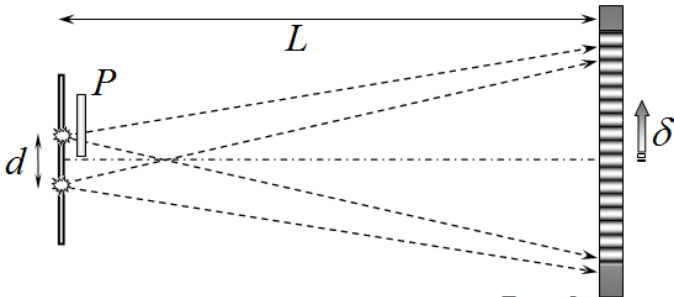


Рис. 3

1.2 Рассчитайте на сколько полос (и в какую сторону) сместится интерференционная картина на экране.

Часть 2. Эксперимент И. Физо – скорость света в движущейся воде.

Чтобы понять идею и цель рассматриваемого опыта И. Физо, процитируем его статью. «*Эти гипотезы (относительно эфира) можно свести к трем основным...: - *эфир связан и как бы прикреплен к молекулам тела и, следовательно, участвует в движениях, которые могут сообщаться этим телам*⁶; - эфир свободен и независим и не увлекается телами в их движениях⁷; - по третьему предположению... свободной остается лишь часть эфира, а другая часть прикрепляется к молекулам тела и только она участвует в его движениях⁸»* Итак, И. Физо поставил цель экспериментально определить, какая из этих гипотез подтверждается экспериментально. Для этого необходимо измерить, как изменяется скорость света в движущейся среде. Обозначим скорость движения среды V , а скорость света в среде v .

2.1 Чему равна скорость света в неподвижной воде?

2.2 Запишите формулу для скорости света в движущей среде, в предположении, что справедлива гипотеза неподвижного эфира.

2.3 Запишите формулу для скорости света в движущей среде, в предположении, что справедлива гипотеза полного увлечения эфира.

В рамках гипотезы частичного увлечения эфира (предложенной О. Френелем) предполагается, что скорость света в движущейся среде складывается из скорости света в неподвижной среде и скорости среды, умноженной на некоторый коэффициент γ , который называется коэффициентом увлечения эфира.

2.4 Каким значениям γ соответствуют гипотезы неподвижного эфира и полного увлечения эфира?

⁶ Далее будем ее называть «Гипотеза полного увлечения эфира»; ⁷ Гипотеза неподвижного эфира; ⁸ Гипотеза частичного увлечения эфира;

На рис. 4 показана схема установки Физо. В этой установке свет проходил через две параллельные трубы T_1 и T_2 по которым равномерно текла вода с некоторой скоростью V . Торцы труб закрыты стеклянными окнами. Оптическая схема установки состояла из источника света И, полупрозрачной пластинки П, трех зеркал $З_1, З_2, З_3$ и экрана Э, на

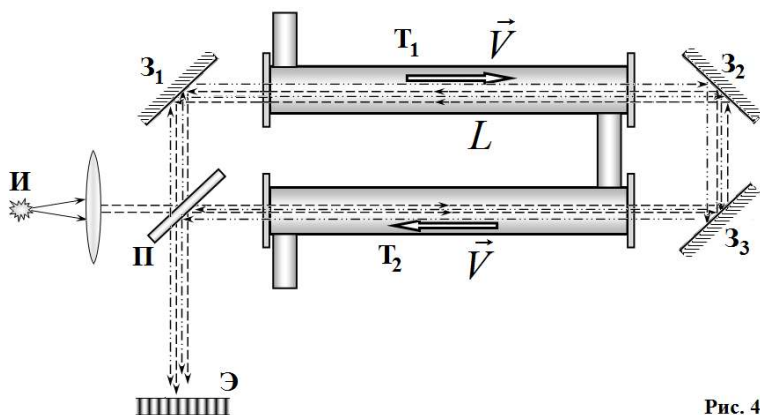


Рис. 4

котором с помощью зрительной трубы с микрометром наблюдается интерференционная картина. Свет от источника с помощью линзы формируется в параллельный пучок, который падал на полупрозрачную пластинку. Пластинка разделяет пучок на две потока. Один из них отражается от пластинки, и следует по пути $З_1, -З_2, -З_3$ попадает на пластинку и отражается в сторону экрана. Этот пучок распространяется в трубах в направлении течения воды. Второй световой пучок движется в обратном направлении: проходит чрез пластинку и далее следует по пути $З_3, -З_2, -З_1$ и также попадает на экран. В результате интерференции этих пучков на экране и возникает система полос. Каждый из пучков проходит в движущейся воде расстояние $L = 1,49$ м в каждой трубе. Можно считать, что скорость движения воды на этом пути постоянна. Для расчета скорости воды И. Физо измерил объем жидкости, протекающий по трубам в единицу времени, и разделил его на площадь поперечного сечения трубы. В своих экспериментах И. Физо использовал свет с длиной волны $\lambda = 526$ нм.

Еще раз процитируем статью И. Физо:

«Во время протекания воды полосы сохраняли хорошую отчетливость: они сдвигались параллельно самим себе без малейшего сомнения на величину, ощутимо пропорциональную скорости воды. При скорости 2 м/с смещение было уже хорошо заметно, при скорости от 4 до 7 м/с оно было вполне измеримым»

Для повышения точности измерений И. Физо измерял смещение полос при изменении направления течения воды. В результате тщательных измерений И. Физо констатировал:

«При ширине одной полосы в пять делений микрометра... было установлено, что при скорости течения воды 7,06 м/с смещение вправо составляло 1,2 деления и смещение влево $-1,2$ деления. Сумма двух смещений равна 2,4 деления, т.е. практически составляет половину полосы»

2.5 Рассчитайте теоретическое значение смещения полос, принимая гипотезу полного увлечения эфира. Совпадает ли это значение с экспериментально полученным значением?

2.6 Принимая гипотезу частичного увлечения эфира, определите значение коэффициента увлечения эфира γ , следующего из результатов эксперимента И. Физо.

Часть 3. Но эфира то нет!

3.1 Покажите, что закон сложения скоростей, предложенный О. Френелем, является следствием релятивистского закона сложения скоростей. Интересно, что О.Френель получил правильную формулу, не зная теории относительности.

3.2 Используя формулу релятивистского сложения скоростей, получите формулу для коэффициента увлечения эфира γ . Выразите его через показатель преломления движущейся среды. Рассчитайте его значение для воды.

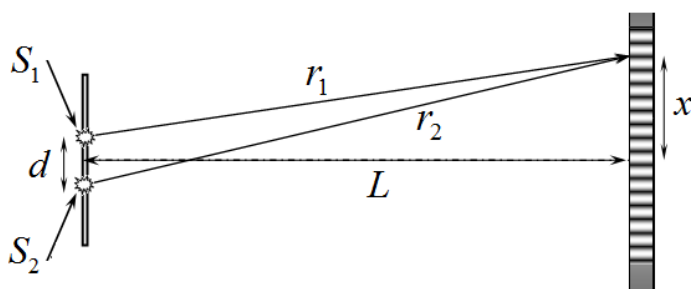
3.3 И. Физо сумел найти причину, объясняющую незначительное отклонение измеренного значения коэффициента γ от теоретического значения. Укажите эту причину и Вы.

Решение

Задача 11- 2. Опыт Физо

Часть 1. Воспоминание об интерференции

Решение этой части задачи традиционное, оно изложено практически во всех учебниках физики. Поэтому ограничимся кратким изложением этого решения, с выделением деталей, существенных при описании экспериментов И. Физо.



1.1 В схеме Юнга интерферирующие волны, идущие от двух источников S_1 и S_2 . В точке экрана с координатой x (измеренной от оси симметрии системы) интенсивность будет максимальна, если разность хода от источников до точки наблюдения равна целому числу длин волн, т.е.

$$r_2 - r_1 = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots) \quad (1)$$

Для расчета этой разности запишем на основании теоремы Пифагора

$$\begin{aligned} r_2^2 &= L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 \\ r_1^2 &= L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Вычтем второе равенство из первого

$$r_2^2 - r_1^2 = (r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = 2xd \quad (3)$$

Так как значения r_2, r_1 мало отличаются от расстояния L , которое значительно больше как расстояния между отверстиями d , так и длины волны λ , можно положить $(r_2 + r_1) \approx 2L$. Поэтому разность расстояний описывается формулой

$$(r_2 - r_1) = \frac{xd}{L} \quad (3)$$

Использование условия максимумов интерференции (1) позволят найти координаты точек максимальной интенсивности:

$$\frac{x_m d}{L} = m\lambda \Rightarrow x_m = m \frac{\lambda L}{d}. \quad (4)$$

Расстояние между соседними максимумами (т.е. ширина полосы) равно

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{\lambda L}{d}. \quad (5)$$

Подстановка численных значений дает результат

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{d} = \frac{0,55 \cdot 10^{-6} \cdot 2,0}{1,0 \cdot 10^{-3}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,1 \text{ мм} \quad (6)$$

1.2 Самый простой способ решения этой части задачи можно найти, используя следующие простые (но общие для любой интерференционной схемы) рассуждения. Переход от одной интерференционной полосы к следующей соответствует увеличению разности хода на одну длину волны! Поэтому если оптическая длина пути в одном из каналов увеличивается на одну длину волны, то интерференционная картина смещается на одну полосу!

Сделаем еще одно замечание, касающееся понятия оптической длины пути. В теории интерференции основную роль играет разность фаз между интерферирующими волнами. Эта разность фаз зависит от длины волны, а именно изменение расстояния на одну длину волны приводит к изменению фазы на 2π . Поэтому для изменения фазы можно записать соотношение

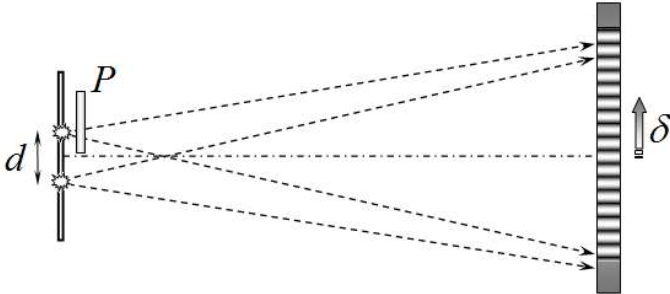
$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta r}{\lambda}. \quad (7)$$

Если свет распространяется в среде с показателем преломления n , то длина волны уменьшается в n раз, поэтому изменение фазы при распространении света в среде будет равно

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta r}{(\lambda_0/n)} = 2\pi \frac{n\Delta r}{\lambda_0}. \quad (8)$$

где λ_0 - длина волны в вакууме.

При подобных расчетах удобно считать, что длина волны остается неизменной и равной λ_0 , а увеличивается длина пути. Именно в этом смысл введения такого понятия, как оптическая длина пути $l = n\Delta r$.



Теперь совсем просто найти смещение интерференционной картины при наличии стеклянной пластинки. Пластинка увеличивает оптическую длину пути для волн от верхнего источника на величину

$$\Delta l = (n - 1)h. \quad (9)$$

Если это увеличение разделить на длину волны (в вакууме!), то получим величину смещения интерференционной картины в единицах ширины полосы, т.е.

$$\frac{\Delta l}{\lambda} = \frac{\delta}{\Delta x} = \Delta m \quad (9)$$

В рассматриваемой задаче это смещение равно

$$\Delta m = \frac{(n-1)h}{\lambda} = \frac{(1,6-1) \cdot 5,0 \cdot 10^{-6}}{0,55 \cdot 10^{-6}} \approx 5,5. \quad (10)$$

Таким образом, интерференционная картина сместится на пять с половиной полос вверх.

Часть 2. Эксперимент И. Физо – скорость света в движущейся воде.

2.1 Скорость света в неподвижной воде в n раз меньше скорости света в вакууме

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{1,33} = 2,26 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (11)$$

2.2 В рамках гипотезы неподвижного эфира движение воды не влияет на скорость света, поэтому

$$v = \frac{c}{n}. \quad (12)$$

2.3 Если справедлива гипотеза полного увлечения эфира, то

$$v = \frac{c}{n} + V. \quad (13)$$

2.4 В общем случае следует записать

$$v = \frac{c}{n} + \gamma V. \quad (14)$$

При неподвижном эфире $\gamma = 0$, при полном увлечении $\gamma = 1$.

2.5 В данном эксперименте сдвиг интерференционных полос обусловлен изменением скорости света при изменении скорости течения воды, в результате чего изменяется длина волны света. Рассчитаем изменение длины волны в общем случае частичного увлечения эфира. Так как частота и период колебаний остаются неизменными, можно записать: Для длины волны ($\lambda_{(\pm)}$ - длины волн при движении «по и против» течения воды):

$$\frac{\lambda_0}{c} = \frac{\lambda_{(\pm)}}{\frac{c}{n} \pm \gamma V} \Rightarrow \lambda_{(\pm)} = \lambda_0 \frac{\frac{c}{n} \pm \gamma V}{c} \quad (15)$$

Для изменения разности хода в каждой трубе в единицах длин волн получим

$$\frac{L}{\lambda_{(\pm)}} = \frac{L}{\lambda_0 \frac{\frac{c}{n} \pm \gamma V}{c}} = \frac{L}{\lambda_0} \cdot \frac{c}{\frac{c}{n} \pm \gamma V} = \frac{L}{\lambda_0} \frac{n}{1 \pm n\gamma \frac{V}{c}} \quad (16)$$

Теперь учтем, что $V \ll c$, поэтому можно это выражение упростить:

$$\frac{L}{\lambda_{(\pm)}} = \frac{L}{\lambda_0} \frac{n}{1 \pm n\gamma \frac{V}{c}} = \frac{Ln}{\lambda_0} \left(1 \mp n\gamma \frac{V}{c} \right) \quad (17)$$

Итак, при движении воды между волнами, распространяющимися в противоположных направлениях, возникает разность хода (и равный ей сдвиг полос)

$$\Delta m_1 = \frac{L}{\lambda_{(-)}} - \frac{L}{\lambda_{(+)}} = 2 \frac{Ln^2}{\lambda_0} \gamma \frac{V}{c}. \quad (18)$$

Так как свет проходит две трубы, то окончательное значение сдвига будет еще в два раза больше

$$\Delta m = 4 \frac{Ln^2}{\lambda_0} \gamma \frac{V}{c}. \quad (19)$$

Подставим численные значения и рассчитаем

$$\Delta m = 4 \frac{Ln^2}{\lambda_0} \gamma \frac{V}{c} = 4 \frac{1,49 \cdot 1,33^2}{526 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{7,06}{3,00 \cdot 10^8} \gamma = 0,472 \gamma. \quad (20)$$

Таким образом, при полном увлечении эфира сдвиг полос должен составить 0,478 ширины интерференционной полосы. В результате измерений И. Физо получил значение сдвига

$$\Delta m_{\text{exp}} = \frac{1,2}{5} \approx 0,24, \quad (21)$$

что почти в 2 раза меньше теоретического сдвига.

2.6 Для объяснение наблюдаемого сдвига следует предположить, что коэффициент увлечения эфира водой равен

$$\gamma = \frac{0,24}{0,47} \approx 0,51 \quad (22)$$

Часть 3. Но эфира то нет!

3.1 Используя формулу для сложения скоростей в СТО для скорости света в движущейся среде получим

$$v = \frac{\frac{c}{n} + V}{1 + \frac{\frac{c}{n} \cdot V}{c^2}} = \frac{c}{n} \frac{1 + n \frac{V}{c}}{1 + \frac{1}{n} \frac{V}{c}} \approx \frac{c}{n} \left(1 + n \frac{V}{c} - \frac{1}{n} \frac{V}{c} \right) = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) V. \quad (23)$$

3.2 Из формулы (23) следует, что коэффициент увлечения связан с показателем преломления соотношением

$$\gamma = 1 - \frac{1}{n^2}. \quad (24)$$

Его численное значение для воды равно

$$\gamma = 1 - \frac{1}{1,33^2} = 0,435. \quad (25)$$

Это значение близко к значению, найденному экспериментально.

3.3 При рассчитанном значении коэффициента увлечения сдвиг полос должен быть равен $\Delta m = 0,472 \gamma \approx 0,205$, что несколько меньше полученного экспериментально. Основной причиной такого расхождения является метод измерения скорости жидкости. Использованное значение скорости является средней скоростью по площади поперечного сечения труб. В действительности свет проходил вблизи оси трубы, где скорость течения больше, чем среднее по сечению значение. В результате чего реальный сдвиг оказался немного больше рассчитанного. Это повлияло и на значение коэффициента увлечения.

⁶ Далее будем ее называть «Гипотеза полного увлечения эфира»; ⁷ Гипотеза неподвижного эфира; ⁸ Гипотеза частичного увлечения эфира;