

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель председателя оргкомитета заключительного этапа
Республиканской олимпиады Заместитель Министра образования

Р.С.Сидоренко
«15» марта 2018 г.



Республиканская физическая олимпиада 2018 год. (Заключительный этап)

Теоретический тур

11 класс.

1. Полный комплект состоит из трех заданий.
2. При оформлении работы каждое задание начинайте с новой страницы. Обязательно нумеруйте все пункты задач. Четко выделяйте ответы по каждому пункту задачи. Первая половина тетради предназначена для чистовика, вторая - для черновика. При недостатке бумаги обращайтесь к оргкомитету!
3. Подписывать тетради и отдельные страницы запрещается.
4. В ходе работы можете использовать ручки, карандаши, чертежные принадлежности, калькулятор.
5. Со всеми вопросами, связанными с условиями задач (но не с их решениями), обращайтесь к представителям Жюри.



Постарайтесь внимательно прочитать условия задач!

Может вам покажется, что условия задач слишком длинные. Но мы сочинили их такими, чтобы Вам было легче решать. Поверьте, иногда решения короче таких условий! Не теряйте присутствия духа, смело беритесь за решение каждой задачи. Помните, оцениваются не только полные решения, но и их отдельные части и даже отдельные здравые мысли.

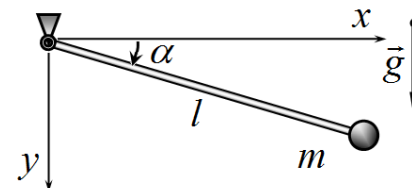
Полоцк
2018

Задание 1. Шарики на спице и как ломаются трубы

Задание 1 состоит из n взаимосвязанных задач.

Задача 1. 1 шарик.

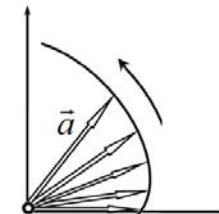
Тонкая жесткая спица длиной l может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей через один из ее концов. На конце спицы закреплен небольшой шарик массы m . Массой спицы можно пренебречь. Спицу располагают горизонтально и отпускают.



Положение спицы в процессе движения будем задавать с помощью угла ее отклонения от горизонтали α . Оси координат направлены так, как показано на рисунке. Шарик можно считать материальной точкой.

- 1.1 Найдите зависимость модуля скорости шарика от угла α .
- 1.2 Найдите зависимость силы \vec{F} , с которой спица действует на шарик от угла α . Укажите направление этой силы.
- 1.3 Найдите зависимость проекций ускорения шарика на оси координат a_x, a_y от угла α .
- 1.4 Постройте годограф вектора ускорения шарика.

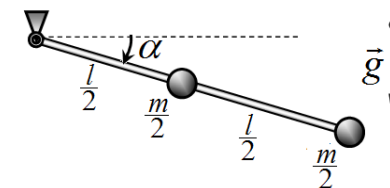
Годографом переменного вектора называется линия, которую описывает конец этого вектора (при условии, что его начало остается в одной точке, например, в начале координат). Иными словами, начало вектора закреплено, сам вектор поворачивается и изменяет свою длину – конец вектора описывает некоторую линию, которая и называется годографом.



- 1.5 Укажите систему координат, в которой модуль ускорения шарика остается постоянным. Чему равен модуль этого ускорения?

Задача 2. 2 шарика

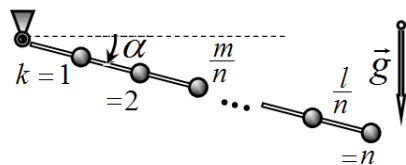
На спицу, описанную в первой части задачи закрепили два шарика, масса каждого из которых равна $\frac{m}{2}$, один на конце спицы, второй на середине спицы. Спицу расположили горизонтально и отпустили.



- 2.1 Найдите зависимость угловой скорости ω спицы от угла α .
- 2.2 Найдите ускорения с которыми начинают двигаться шарики (т.е. при $\alpha = 0$)
- 2.3 Найдите силу, с которой спица действует на крайний шарик в начальный момент времени (при $\alpha = 0$). Укажите направление этой силы.

Задача n . n шариков.

На спицу закрепили n одинаковых шариков, масса каждого равна $\frac{m}{n}$ на равном расстоянии друг от друга, причем крайний шарик находится на конце спицы. Считайте, что число шариков велико, т.е. $n \gg 1$. Спицу располагают горизонтально и отпускают.



- 3.1 Найдите зависимость угловой скорости спицы ω от угла отклонения α .
- 3.2 Найдите ускорения шариков a_k ($k = 1, 2, \dots, n$) в начальный момент движения спицы.
- 3.3 Найдите силу, действующую на k -тый шарик со стороны спицы, в начальный момент движения. Постройте график полученной зависимости.
- 3.4 Кратко объясните природу возникновения этих сил.
- 3.5 Объясните, почему ломаются дымовые трубы при падении. На каком расстоянии чаще всего происходит излом?



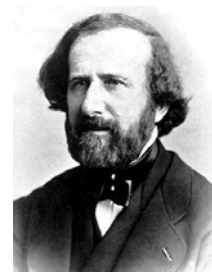
В этом пункте вам не надо писать никаких уравнений, формул. Качественно, кратко (1-2 предложения) выявите основную причину излома и укажите высоту, на которой он чаще происходит.

Небольшая математическая подсказка.

$$\sum_{k=1}^n k = 1 + 2 + 3 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}$$

$$\sum_{k=1}^n k^2 = 1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + n^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$$

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 $c = 3,00 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$, 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.

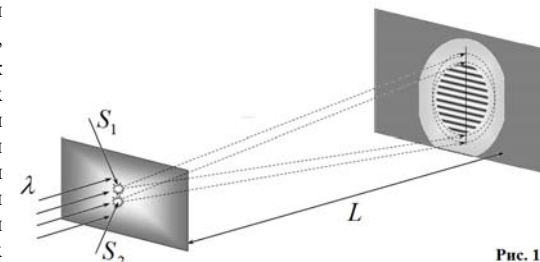


Рис. 1

Рассмотрим описанную установку со следующими параметрами: Расстояние между отверстиями $d = 1,0 \text{ мм}$; расстояние до экрана $L = 2,0 \text{ м}$, длина волны света $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. (рис. 2)

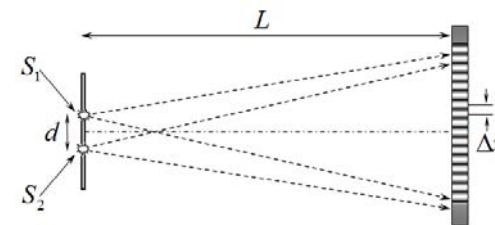


Рис. 2

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 $h = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, а показатель преломления $n = 1,6$. При такой малой толщине можно пренебречь смещением лучей в пластинке.

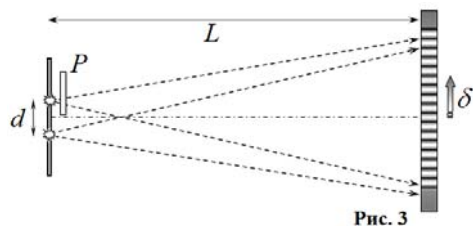


Рис. 3

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 телам¹;
- эфир свободен и независим и не увлекается телами в их движениях²;
- по третьему предположению... свободной остается лишь часть эфира, а другая часть прикрепляется к молекулам тела и только она участвует в его движениях³»

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 движущейся среде, в предположении, что справедлива гипотеза неподвижного эфира.

2.3 Запишите формулу для скорости света в движущейся 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?

¹ Далее будем ее называть «Гипотеза полного увлечения эфира»;

² Гипотеза неподвижного эфира;

³ 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 Z_1 , Z_2 , Z_3 и экрана $Э$, на котором с помощью зрительной

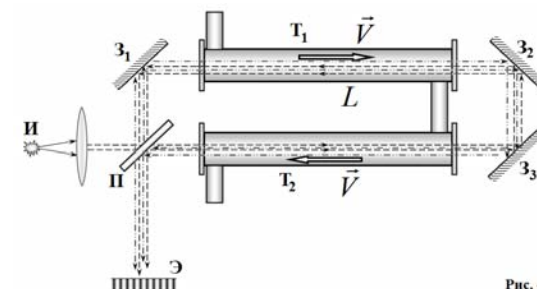


Рис. 4

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 Z_1 , - Z_2 , - Z_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 через пластинку и далее следует по пути Z_3 , - Z_2 , - Z_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 $L = 1,49 \text{ м}$ 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 $\lambda = 526 \text{ нм}$.

Еще раз процитируем статью И. Физо:

«Во время протекания воды полосы сохраняли хорошую отчетливость: они сдвигались параллельно самим себе без малейшего сомнения на величину, ощутило 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.

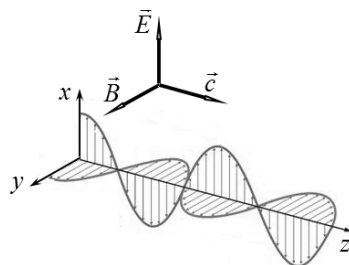


Задача 3 Давление света.

В некоторых книгах утверждается, что давление света подтверждает его квантовую природу. Однако, описать это явление можно точно и в рамках классической физики. Знаменитый исследователь давления света П.Н. Лебедев в своих экспериментах проверял теорию электромагнитную теорию Дж.К. Максвелла. В данной задаче вам предстоит рассчитать величину давления света, используя законы классической физики.

Часть 1. Свойства электромагнитных волн.

Свет представляет собой электромагнитную волну. Эта волна является поперечной: векторы напряженности электрического поля \vec{E} и индукции магнитного поля \vec{B} взаимно перпендикулярны и перпендикулярны направлению распространения волны \vec{c} (см. рисунок). Колебания напряженности электрического поля и индукции магнитного поля происходят в одной фазе, поэтому в произвольной точке они могут быть описаны функциями



$$\begin{cases} E = E_0 \cos \omega t \\ B = B_0 \cos \omega t \end{cases} \quad (1)$$

Амплитуды колебаний напряженности электрического поля и индукции магнитного поля связаны между собой так, что средняя объемная плотность энергии электрического поля равна средней объемной плотности энергии магнитного поля

$$\langle w_E \rangle = \langle w_B \rangle \quad (2)$$

Объемные плотности энергии электрического и магнитного полей определяются по формулам

$$w_E = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}, \quad w_B = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (3)$$

Скорость электромагнитной волны (скорость света) в вакууме рассчитывается по формуле

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}, \quad (4)$$

где ϵ_0, μ_0 - электрическая и магнитная постоянные, соответственно.

1.1 Запишите соотношение между амплитудами колебаний напряженности электрического E_0 поля, индукции магнитного поля B_0 и скоростью света c .

1.2 Выразите интенсивность света I через амплитуду колебаний вектора напряженности электрического поля волны E_0 .

Интенсивностью света называется усредненное по времени количество энергии, переносимой волной в единицу времени через площадку единичной площади $I = \frac{\Delta W}{\Delta t \Delta S}$

Часть 2. Движение электронов в металле и электрическое сопротивление.

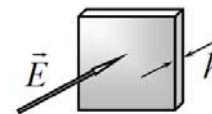
Как известно, носителями электрического тока в металлах являются свободные электроны.

2.1 Рассчитайте концентрацию свободных электронов n в меди.

Считайте, что каждый атом меди отдает один электрон в облако свободных электронов.

Молярная масса меди $M_{Cu} = 63,5 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, плотность меди $\rho_{Cu} = 8,92 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, постоянная Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$, заряд электрона $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{А}^2 \cdot \text{с}^4}{\text{кг} \cdot \text{м}^3}$

Медная пластинка толщиной $h = 1,0 \text{ см}$ помещена во внешнее однородное электростатическое поле напряженности $E = 30 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ (в таких полях наступает электрический пробой воздуха). Вектор напряженности поля перпендикулярен поверхности пластинки.



2.2 Рассчитайте, какая доля свободных электронов создает индуцированный заряд на поверхности пластинки при заданной напряженности внешнего электрического поля.

Для описания электрического сопротивления металлов в классической физике предполагается, что на движущийся в металле электрон действует тормозящая сила, пропорциональная его скорости

$$\vec{F} = -\beta \vec{v} \quad (5)$$

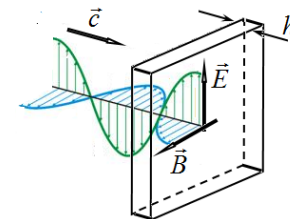
2.3 Выразите коэффициент пропорциональности β в формуле (5), через удельное электрическое сопротивление металла ρ и концентрацию свободных электронов n .

Часть 3. Давление света на поверхность металла.

Для расчета давления света рассмотрите следующую модель. Плоская электромагнитная волна падает нормально на очень тонкую металлическую пластинку толщиной h . Отражение волны не учитывать. Изменением амплитуды волны при прохождении через пластинку можно пренебречь, поэтому во всех точках пластинки поля описываются уравнениями (1).

Движение электронов описывается на основании закона Ньютона, причем в первом приближении можно пренебречь влиянием магнитного поля волны на движение электрона. Начальную скорость электрона считайте равной нулю.

В дальнейшем считайте известными следующие величины: n - концентрация свободных электронов в пластинке, коэффициент сопротивления движению β для этих электронов, E_0 - амплитуда напряженности электрического поля волны, ω - круговая частота волны, h, S - толщина и площадь пластинки, m, e - масса и заряд электрона, c - скорость света. Ответы на последующие вопросы выражайте через эти величины.



⁴ Не путайте с плотностью!

- 3.1 Пренебрегая силой сопротивления, действующей на электрон, найдите зависимость скорости электрона от времени, при действии на него электромагнитной волны $v(t)$.
- 3.2 Рассчитайте среднее значение силы Лоренца, действующей на электрон в этом случае.

Далее следует учитывать действие силы сопротивления (4) на электрон.

- 3.3 Найдите зависимость скорости электрона от времени $v(t)$ при действии на него электрического поля волны.

Подсказка.

Представьте эту зависимость в виде $v(t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t$, найдите значения коэффициентов этой зависимости.

- 3.4 Найдите усредненное по времени значение силы Лоренца, действующей на электрон. Укажите направление этой силы.
- 3.5 Найдите силу, действующую на всю пластинку со стороны падающей волны.

- 3.6 Рассчитайте коэффициент поглощения электромагнитной волны пластинкой K .

Коэффициентом поглощения называется отношение поглощенной энергии к энергии падающей волны.

- 3.7 Получите формулу для давления света на пластинку, выразите это давление через интенсивность волны и коэффициент поглощения пластинки.