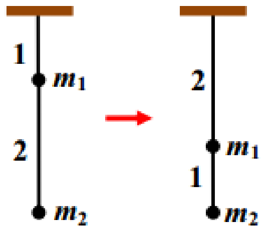
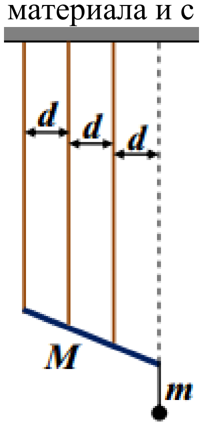
ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ «Робофест» по ФИЗИКЕ
ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ (ФИНАЛЬНЫЙ) ЭТАП 2022 года, ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ТУР
БИЛЕТ № 02 (10-11 классы): возможные решения и критерии

Задание 1:



Вопрос: Два легких и прочных отрезка проволоки изготовлены из одного материала и имеют одинаковое поперечное сечение, но длина отрезка 2 в два раза больше, чем у отрезка 1. Когда на них подвесили два тяжелых груза так, как показано на левом рисунке, отрезок 1 растянулся на 3 мм, а отрезок 2 – на 4 мм. Затем отрезки поменяли местами (см. рисунок справа). Каковы теперь величины их деформаций?

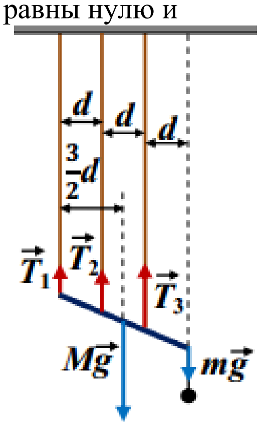
Задача: Массивный жесткий стержень подвешен к жесткому горизонтальному потолку на трех легких почти нерастяжимых длинных тросах разной длины, но из одинакового материала и с одинаковым сечением. Их длины подобраны так, чтобы при опускании стержня они натягивались одновременно. В состоянии равновесия все три троса натянуты и вертикальны, причем первый трос прикреплен к левому концу стержня, второй – к точке на расстоянии трети длины стержня от этого конца, а третий – на расстоянии трети длины стержня от правого конца. В этом состоянии первый трос растянут на $\Delta l_0 = 4{,}0$ мм. Когда к правому концу стержня на отрезке легкой нити подвесили маленький груз массой $m_1 = 200$ г (см. рисунок), величина деформации первого троса стала равна $\Delta l_1 = 2{,}2$ мм. Какой станет величина деформации этого троса, если массу груза увеличить до $m_2 = 400$ г? А при массе груза, равной $m_3 = 600$ г? Деформации стержня и потолка считать пренебрежимо малыми по сравнению с деформациями тросов.



Ответ на вопрос: При одинаковом материале и поперечном сечении коэффициент жесткости отрезка проволоки обратно пропорционален его длине, поэтому, если коэффициент жесткости отрезка 2 обозначить k, то коэффициент жесткости отрезка 1 равен $2k$. В первом случае отрезок 2 растягивается весом второго груза, и его деформация $\Delta L_2 = \dfrac{m_2 g}{k}$, а деформация отрезка 1, который растягивается суммарным весом обоих грузов, $\Delta L_1 = \dfrac{(m_1 + m_2)g}{2k}$. После того, как отрезки поменяли местами, $\Delta L_1' = \dfrac{m_2 g}{2k} = \dfrac{\Delta L_2}{2} = 2$ мм и $\Delta L_2' = \dfrac{(m_1 + m_2)g}{k} = 2\Delta L_1 = 6$ мм.

Правильно определено соотношение коэффициентов жесткости отрезков	**2**
Правильно определены силы, растягивающие оба отрезка в первом случае	**1+1=2**
Получены правильные ответы для деформаций обоих отрезков во втором случае (достаточно чисел)	**3+3=6**
ВСЕГО	**10**

Решение задачи: Предположим, что все три троса натянуты, то есть силы натяжения не равны нулю и направлены вверх. Рассмотрим равновесие стержня под действием приложенных к нему сил (показаны на рисунке – ясно, что сила натяжения нити, на которой подвешен груз, равна силе тяжести, действующей на этот груз). Условие равновесия сил приводит к уравнению $T_1 + T_2 + T_3 = Mg + mg$ (1), правило моментов (запишем его относительно точки прикрепления первого троса) – к $T_2 \cdot d + T_3 \cdot 2d = Mg \cdot \dfrac{3}{2}d + mg \cdot 3d$, то есть $T_2 + 2T_3 = \dfrac{3}{2}Mg + 3mg$ (2). Этих уравнений не хватает для определения сил натяжения. Но у нас есть возможность пренебрегать деформациями стержня и потолка, то есть считать их прямыми. Поэтому величины деформаций тросов прямо пропорционально расстоянию по горизонтали от вершины образованного этими прямыми угла до троса. Поскольку трос 2 находится точно между тросами 1 и 3, величина его деформации есть полусумма деформаций этих тросов: $\Delta L_2 = (\Delta L_1 + \Delta L_3)/2$. Коэффициенты жесткости тросов обратно пропорциональны их длинам, так что из этого соотношения получаем еще одно уравнение на силы натяжения: $2L_2T_2 = L_1T_1 + L_3T_3$ (3). Ясно, что из этой системы можно найти любую из сил натяжения, но в ответ войдут неизвестные нам соотношения длин тросов. На самом деле для решения данной задачи нам достаточно заметить, что все три уравнения



линейны, и массы стержня и груза входят в эти уравнения также линейно. Поэтому, если выразить силы натяжения T_2 и T_3 из (1) и (2), а затем подставить полученные выражения в (3), то мы получим линейную связь T_1 с M и m. Более того, очевидно, что эта связь будет и однородной – ясно, что при $M = m = 0$ мы должны получить $T_1 = 0$. Итак, для данной задачи существуют такие постоянные (не зависящие от масс) величины A и B, что $T_1 = AM + Bm$. Но это означает, что и деформация первого троса есть линейная функция масс: $\Delta L_1 = aM + bm$, где a и b – постоянные. С учетом двух известных ее значений находим общее выражение:

$$\begin{cases} \Delta l_0 = aM \\ \Delta l_1 = aM + bm_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} aM = \Delta l_0 \\ b = -\dfrac{\Delta l_0 - \Delta l_1}{m_1} \end{cases} \Rightarrow \Delta L_1 = \Delta l_0 - \frac{\Delta l_0 - \Delta l_1}{m_1} m.$$

Например, при $m = m_2$ получаем $\Delta l_2 = \Delta l_0 - \dfrac{\Delta l_0 - \Delta l_1}{m_1} m_2 = 0{,}4$мм. Для третьего значения массы $m = m_3$ мы получим по данной формуле отрицательное значение, но на самом деле наша формула говорит о том, что при $m = \dfrac{\Delta l_0}{\Delta l_0 - \Delta l_1} m_1 = 444\dfrac{4}{9}$ г сила натяжения первого троса обращается в ноль, то есть он провисает. Ясно, что при дальнейшем увеличении массы груза трос останется провисшим, и при $m = m_3 = 600$г $\Delta l_3 = 0$.

Ответ: $\Delta l_2 = \Delta l_0 - \dfrac{\Delta l_0 - \Delta l_1}{m_1} m_2 = 0{,}4$мм, $\Delta l_3 = 0$.

Есть рисунок с указанием всех сил действующих на стержень (или их перечисление)	**1**
Правильно записано уравнение баланса сил	**1**
Правильно записано уравнение моментов	**2**
Получено третье независимое уравнение на силы натяжения, эквивалентное (3)	**2**
Сделан вывод, что связь ΔL_1 с и M и m – линейная и однородная*	**2**
Получено общее выражение, эквивалентное $\Delta L_1 = \Delta l_0 - \dfrac{\Delta l_0 - \Delta l_1}{m_1} m$*	**3**
Получен правильный ответ при $m = m_2$	**2**
Получен правильный ответ при $m = m_3$	**2**
ВСЕГО	**15**

*Участник можем заменить общие рассуждения о линейности «честным» решением системы (1-3). В этом случае нужно заметить, что из геометрии $L_3 - L_2 = L_2 - L_1 \equiv H$. Поэтому (3) можно переписать в виде $2(1+\varepsilon)T_2 = T_1 + (1+2\varepsilon)T_3$, где $\varepsilon \equiv \dfrac{H}{L_1}$. Тогда из системы (1-3) находим, что $T_1 = \dfrac{g}{12(1+\varepsilon)} M - \dfrac{(2+3\varepsilon)g}{3(1+\varepsilon)} m$. Таким образом, здесь линейная однородная зависимость получена в явном виде. Кроме того, явно обнаружено существование «критической» массы груза $m_c = \dfrac{M}{4(2+3\varepsilon)}$, при превышении которой первый трос провисает. Для деформации $\Delta L_1 = \dfrac{T_1}{k_1} = \dfrac{g}{12k_1(1+\varepsilon)} M - \dfrac{(2+3\varepsilon)g}{3k_1(1+\varepsilon)} m \equiv aM + bm$, и мы снова можем подобрать значения появившихся констант по двум точкам и получить те же ответы.

Задание 2:

Вопрос: Как связаны между собой изменение внутренней энергии идеального газа и его работа в изобарном процессе?

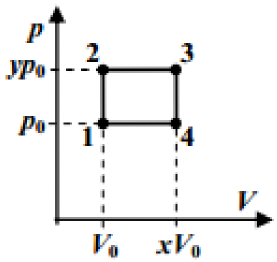
Задача: Рабочим телом тепловой машины является постоянное количество одноатомного идеального газа. Цикл рабочего тела на графике в координатах давление-объем имеет вид прямоугольника и состоит из двух изобар и двух изохор. Минимальное давление, максимальное давление и минимальный объем газа в этом цикле зафиксированы, а максимальный объем можно изменять. Оказалось, что при $V_{max}/V_{min}=1{,}3$ КПД цикла равно 5%. Каким станет КПД цикла при $V_{max}/V_{min}=1{,}9$?

Ответ на вопрос: Внутренняя энергия ν молей идеального газа при температуре T может быть вычислена по формуле $U=\frac{i}{2}\nu RT$, где число степеней свободы молекулы $i=3$ для одноатомного газа, $i=5$ для двухатомного и $i=6$ для многоатомного. В изобарном процессе работа $A=p\cdot\Delta V=\Delta(pV)$, и с учетом уравнения Менделеева-Клапейрона $pV=\nu RT$ видно, что $A=\nu R\Delta T$. Таким образом, $\Delta U=\frac{i}{2}A$.

Записано выражение для внутренней энергии идеального газа*	**2**
Записано выражение для работы в изобарном процессе	**2**
Использовано уравнение Менделеева-Клапейрона	**2**
Получена правильная связь $\Delta U=\frac{i}{2}A$*	**4**
ВСЕГО	**10**

*Если все выражения записаны только для одноатомного газа, за эти пункты выставляется половина баллов (1 и 2 соответственно).

Решение задачи: Пусть минимальный объем газа в цикле – это V_0, а минимальное давление p_0. Максимальный объем обозначим $x\cdot V_0$, а максимальное давление $y\cdot p_0$. Тогда работа газа в цикле равна его площади $A=(p_{max}-p_{min})(V_{max}-V_{min})=p_0V_0(x-1)(y-1)$. Теплота поступает к газу от нагревателя в процессах 1-2 (изохора) и 2-3 (изобара). В изохорном процессе работа не совершается, и $Q_{12}=\Delta U_{12}=\frac{3}{2}V_0(p_2-p_0)=\frac{3}{2}p_0V_0(y-1)$. В изобарном процессе, как видно из ответа на вопрос, $Q_{23}=\frac{5}{3}\Delta U_{23}=\frac{5}{2}p_2(V_3-V_2)=\frac{5}{2}p_0V_0y(x-1)$. Следовательно,

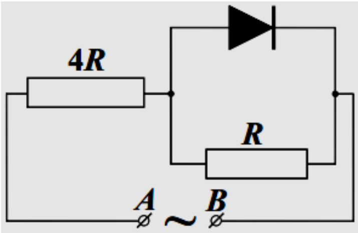


количество теплоты, полученное газом от нагревателя в этом цикле $Q_H=\frac{p_0V_0}{2}[3(y-1)+5y(x-1)]$. Значит, КПД цикла определяется выражением $\eta=\frac{A}{Q_H}=\frac{2(y-1)(x-1)}{3(y-1)+5y(x-1)}$. Полезно обратить внимание, что это соотношение можно переписать в виде $\frac{1}{\eta}=\frac{5y}{2(y-1)}+\frac{3}{2(x-1)}$. Как видно, здесь величина $a\equiv\frac{5y}{2(y-1)}=\frac{5p_{max}}{2(p_{max}-p_{min})}$ постоянна для всех циклов. Используем известное значение КПД при $x=1{,}3$: $20=a+5\Rightarrow a=15$ (это соответствует $y=1{,}2$). В результате приходим к выражению $\frac{1}{\eta}=15+\frac{3}{2(x-1)}$. Тогда при $x=1{,}9$ КПД определяется из соотношения $\frac{1}{\eta}=15+\frac{5}{3}=\frac{50}{3}\Rightarrow\eta=0{,}06$, то есть 6 %.

Ответ: 6 %.

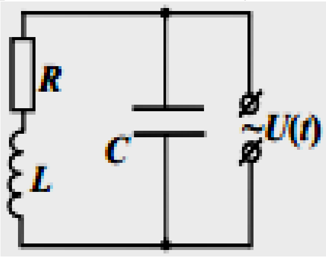
Записаны правильные выражения для любых двух величин (из списка: работа, теплота нагревателя, теплота холодильника) для данного цикла через давления и объемы либо их соотношения	**2+2=4**
Получено правильное выражение для КПД цикла, записанное через две независимые переменные, одной из которых является V_{max}/V_{min}	**3**
По заданному значению КПД определено значение второй переменной	**3**
Получено общее выражение для КПД как функции переменной V_{max}/V_{min}	**2**
Получен правильный ответ для КПД при втором значении этой переменной	**3**
ВСЕГО	**15**

Задание 3:



Вопрос: Найдите действующее значение силы тока в резисторе с сопротивлением $R = 120$ Ом в схеме, показанной на рисунке, если на вход АВ подается синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m = 300$ В. Диод считайте идеальным.

Задача: Схема из конденсатора с емкостью C, катушки с индуктивностью L и омическим сопротивлением $R = 36$ Ом подключена к источнику синусоидального напряжения с амплитудой $U_m = 300$ В. Известно, что циклическая частота внешнего напряжения в точности равна $\omega = \frac{4}{5\sqrt{LC}}$. Кроме того, параметры схемы связаны соотношением $\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{5}{3}R$. Найдите амплитуду силы общего тока (в ветви с источником) и сдвиг фаз между этим током и внешним напряжением.

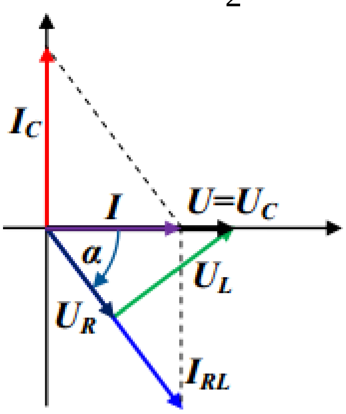


Ответ на вопрос: В ту половину периода T синусоидального напряжения, когда потенциал A выше потенциала B, диода открыт, и резистор с сопротивлением R закорочен, ток через него не идет и тепло не выделяется, так что $Q_I = 0$. При запертом диоде (вторая «половинка синусоиды») через этот резистор течет ток с амплитудой $\frac{U_m}{5R}$, и в резисторе R выделяется количество теплоты $Q_{II} = \frac{1}{2}\left(\frac{U_m}{5R}\right)^2 R\frac{T}{2} = \frac{1}{100}\frac{U_m^2 T}{R}$ (здесь множитель ½ появляется из-за усреднения квадрата гармонической функции). Полное количество теплоты, выделившееся за период в резисторе R равно $Q = Q_I + Q_{II} = \frac{1}{100}\frac{U_m^2 T}{R}$, и по определению действующего значения силы тока $I_a^2 RT = \frac{1}{100}\frac{U_m^2 T}{R}$, то есть $I_a = \frac{1}{10}\frac{U_m}{R} = 0{,}25$ А.

Указано, что в одну половину периода ток через резистор R не течет	**1**
Указано, что теплота в эту половину периода в нем не выделяется	**1**
Определено, что во вторую половину периода через резистор R течет синусоидальный ток с амплитудой $\frac{U_m}{5R}$	**2**
Правильно найдено $Q_{II} = \frac{1}{100}\frac{U_m^2 T}{R}$	**3**
Правильно найдено действующее значение силы тока (достаточно числа)	**3**
ВСЕГО	**10**

Решение задачи: В данной схеме неидеальную катушку можно рассматривать как последовательно соединенные идеальную индуктивность и резистор. Ток через них – общий, причем напряжение на резисторе колеблется синфазно с током, а напряжение на индуктивности опережает ток по фазе на $\frac{\pi}{2}$.

Поэтому на фазовой диаграмме вектора, отвечающие колебаниям этих напряжений, взаимно перпендикулярны. Однако сумма этих напряжений в любой момент равна напряжению источника, а амплитуды их колебаний относятся как 3:4. В самом деле, если I_{RLm} – амплитуда колебаний их общего тока, то $U_{Rm} = R \cdot I_{RLm}$, а $U_{Lm} = \omega L \cdot I_{RLm} = \frac{4}{5}\sqrt{\frac{L}{C}} \cdot I_{RLm} = \frac{4}{3}R \cdot I_{RLm}$, в соответствии с заданными значениями частоты и параметров схемы. Из фазовой диаграммы (см. рисунок) понятно, что $U_m^2 = U_{Rm}^2 + U_{Lm}^2 = \frac{25}{9}U_{Rm}^2 \Rightarrow U_{Rm} = \frac{3}{5}U_m$ и поэтому $I_{RLm} = \frac{3}{5}\frac{U_m}{R}$. При



этом ток I_{RL} отстает от входного напряжения по фазе на $\alpha = \arcsin\left(\frac{4}{5}\right)$. С другой стороны, напряжение на конденсаторе равно напряжению источника. Ток через конденсатор с амплитудой

$I_{Cm} = \omega C \cdot U_m = \frac{4}{5}\sqrt{\frac{C}{L}}U_m = \frac{12}{25}\frac{U_m}{R}$ опережает напряжение по фазе на $\frac{\pi}{2}$. Складывая колебания токов через ветви, получаем колебания общего тока схемы. Можно определить проекции вектора, отвечающего колебаниям общего тока, на оси диаграммы: $I_x = I_{RLm}\cos(\alpha) = \frac{9}{25}\frac{U_m}{R}$ и $I_y = I_{Cm} - I_{RLm}\sin(\alpha) = 0$. Таким образом, амплитуда колебаний силы общего тока равна $I_m = \frac{9}{25}\frac{U_m}{R} = 3$А, а сдвиг фаз между этим током и входным напряжением $\varphi = 0$.

Ответ: $I_m = \frac{9}{25}\frac{U_m}{R} = 3$А, $\varphi = 0$.

Указано (используется в решении), что колебания напряжения на индуктивности катушки опережают по фазе колебания напряжении на ее сопротивлении на π/2	**1**
Правильно построен (прямоугольный) треугольник для напряжений $U_R + U_L = U = U_C$ на фазовой диаграмме	**2**
Правильно найдена амплитуда силы тока через катушку $I_{RLm} = \frac{3}{5}\frac{U_m}{R}$	**2**
Правильно найдено смещение по фазе тока через катушку от входного напряжения (– α)	**1**
Правильно найдена амплитуда силы тока через конденсатор $I_{Cm} = \frac{12}{25}\frac{U_m}{R}$	**2**
Правильно построена треугольник токов $I_{RL} + I_C = I$ на фазовой диаграмме	**2**
Правильно найдена амплитуда общего тока (число)	**3**
Определено, что сдвиг фаз между общим током и входным напряжением отсутствует	**2**
ВСЕГО	**15**

Примечание: Участники имеют право использовать метод комплексных амплитуд. В этом случае комплексное сопротивление схемы Z определяется из соотношения

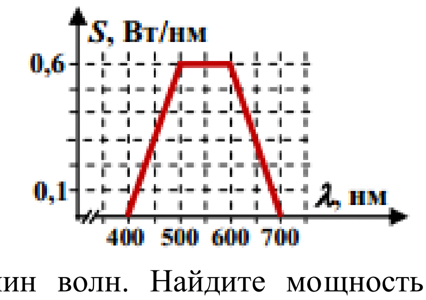
$$\frac{1}{Z} = i\omega C + \frac{1}{R + i\omega L} = \frac{1}{R}\left[\frac{12}{25}i + \frac{3}{3+4i}\right] = \frac{1}{25R}[12i + 3(3-4i)] = \frac{9}{25R}.$$

Следовательно, фазовый сдвиг между током и напряжением отсутствует, а $I_m = \frac{9}{25}\frac{U_m}{R} = 3$А.

Задание 4:

Вопрос: Световое излучение – это разновидность *электромагнитных волн*, причем разные цвета отличаются друг от друга *длиной волны λ*. В таблице ниже приведена связь между длиной волны в нанометрах (1 нм = 10^{-9}м) и видимым цветом:

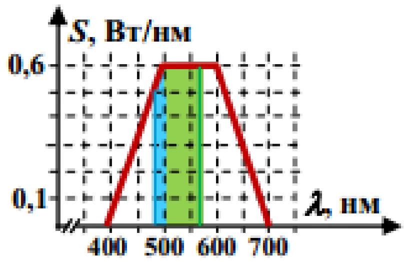
красный	оранжевый	желтый	зеленый	голубой	синий	фиолетовый
625-740 нм	590-625 нм	565-590 нм	500-565 нм	485-500 нм	440-485 нм	380-440 нм



На графике показан *спектр* источника света с мощностью излучения 120 Вт, то есть зависимость величины $S \equiv \frac{\Delta P}{\Delta \lambda}|_{\Delta\lambda \to 0}$ (где ΔP – мощность излучения, приходящаяся на интервал длин волн $\Delta\lambda$), от длины волны. Весь свет от этого источника проходит через зелено-голубой светофильтр, который практически полностью пропускает излучение длин волн из этих диапазонов, и практически не пропускает излучение других длин волн. Найдите мощность прошедшего света.

Задача: Сила тока фотодатчика прямо пропорциональна мощности светового излучения, поступающего в его «входное окно». Этот датчик разместили на небольшом роботе так, что он всегда «смотрит» вперед по ходу движения робота. Робот едет по прямой трассе с постоянной скоростью $v = 1{,}5$м/с на полигоне, на котором единственным источником освещения является небольшая яркая лампа, светящая равномерно во всех направлениях. В некоторый момент времени ($t_1 \equiv 0$) сила тока фотодатчика оказалась равна $I_1 = 42$мА, к моменту $t_2 = 7$с она увеличилась до $I_2 = 56$мА, а в момент $t_3 = 16$с впервые обратилась в ноль. На каком расстоянии от трассы установлена лампа? Воздух между лампой и фотодатчиком считать полностью прозрачным.

Ответ на вопрос: По смыслу величины S понятно, что площадь под графиком этой величины – это мощность (нетрудно, например, заметить, что площадь под всем графиком в точности равна 120 Вт). Зелено-голубой светофильтр пропустит из всего излучения только то, для которого длины волн лежат в полосе от 485 нм до 565 нм. Значит, мощность прошедшего света соответствует площади под графиком в этой полосе (выделенная фигура на рисунке). Эта фигура состоит из прямоугольника и трапеции, так что



$$P' = 0{,}6(\text{Вт/нм}) \times 65\text{нм} + \frac{0{,}6(\text{Вт/нм}) + 0{,}51(\text{Вт/нм})}{2} \times 15\text{нм} \approx 47 \text{ Вт.}$$

Указано, что площадь под графиком введенной величины – это мощность	**4**
Указано, что мощность прошедшего через светофильтр света – площадь под графиком в полосе диапазона от 485 нм до 565 нм	**3**
Получен правильный ответ (число – зачетный диапазон от 47 до 47,5 Вт*)	**3**
ВСЕГО	**10**

*При попадании в только диапазон от 46,5 до 48 Вт ставится 2 балла, в диапазон от 45 до 49 Вт – 1 балл.

Решение задачи: Начнем с того, что разберемся, как показания фотодатчика должны зависеть от времени. Так как изучение лампы сферически симметрично, а площадь сферы растет пропорционально квадрату ее радиуса, то приходящаяся на заданную площадь мощность излучения на расстоянии r от лампы $P(r) = \frac{P_0 r_0^2}{r^2}$, где r_0 – минимальное расстояние от трассы до лампы, на котором мощность равна P_0. Однако нужно еще учесть, что входное окно датчика не направлено на лампу, а «смотрит» вперед по ходу движения. При повороте окна датчика на угол α от направления на лампу площадь, с которой в окно попадают лучи, уменьшается по закону $S = S_0 \cos(\alpha)$. С другой стороны (см. рисунок), $\cos(\alpha) = \frac{x}{r}$, где x– расстояние от робота до точки наибольшего сближения с лампой. Таким образом, сила тока фотодатчика изменяется по закону $I(t) = C\frac{x}{r^3} = C\frac{x}{(r_0^2 + x^2)^{3/2}}$, где C – некоторая постоянная. Как видно, момент обращения силы тока в ноль соответствует прохождению точки наибольшего сближения ($x = 0$), и с учетом закона движения робота можно записать $x(t) = v(t_3 - t)$. В результате мы можем записать два независимых соотношения для известных значений силы тока фотодатчика, и найти из них искомую величину r_0:

$$\begin{cases} I_1 = C\dfrac{v(t_3 - t_1)}{[r_0^2 + v^2(t_3 - t_1)^2]^{3/2}} \\ I_2 = C\dfrac{v(t_3 - t_2)}{[r_0^2 + v^2(t_3 - t_2)^2]^{3/2}} \end{cases} \Rightarrow z \equiv \left[\frac{I_2(t_3 - t_1)}{I_1(t_3 - t_2)}\right]^{2/3} = \frac{r_0^2 + v^2(t_3 - t_1)^2}{r_0^2 + v^2(t_3 - t_2)^2},$$

откуда $r_0 = v\sqrt{\frac{(t_3 - t_1)^2 - z(t_3 - t_2)^2}{z - 1}}$. Подставляя числовые данные, обнаруживаем, что $z = \frac{16}{9}$ и $r_0 = 18$ м.

Ответ: $r_0 = v\sqrt{\frac{(t_3 - t_1)^2 - z(t_3 - t_2)^2}{z - 1}} = 18$м, где $z \equiv \left[\frac{I_2(t_3 - t_1)}{I_1(t_3 - t_2)}\right]^{2/3} = \frac{16}{9}$.

Указано (используется в решении), что приходящаяся на заданную площадь мощность излучения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от лампы	**2**
Указано (используется в решении), что при повороте окна датчика от направления на лампу площадь, с которой в окно попадают лучи, уменьшается по закону $S = S_0 \cos(\alpha)$	**2**
Обнаружено, что сила тока фотодатчика изменяется по закону $I(t) = C\frac{x(t)}{(r_0^2 + x^2(t))^{3/2}}$	**3**
Указано (используется в решении), что момент t_3 отвечает $x = 0$	**1**
Правильно записана полная система уравнений, из которой можно найти r_0	**3**
Получена правильное аналитическое выражение для r_0	**2**
Получен правильный численный ответ для r_0	**2**
ВСЕГО	**15**