



**Варламов Сергей Дмитриевич**

*Кандидат физико-математических наук, доцент  
кафедры физики специализированного  
учебно-научного центра МГУ им. М.В. Ломоносова.  
Член жюри Московской городской и Всероссийской  
олимпиад школьников по физике.*

## Физические задачи-оценки (задачи 4-7)

Продолжаем публикацию физических задач-оценок (ЗО), для решения которых требуются в основном знания по физике в объёме средней школы. Эти задачи не всегда имеют точное и однозначное решение. Для ответа на поставленные в задачах вопросы можно дополнять условие задачи, строить упрощённую модель процесса, чем-то пренебрегать, использовать табличные данные.

Предполагается регулярно знакомить читателей с задачами-оценками, и мы надеемся, что читатели будут присылать свои задачи-оценки, лучшие из которых тоже будут напечатаны в нашем журнале.

Ниже опубликована очередная серия из четырёх задач. Приведены условия и решения трёх задач ЗО-4, ЗО-5 и ЗО-6. Причём условие ЗО-4 (без решения) было опубликовано ранее, и эта задача предлагалась тогда для самостоятельного решения. Четвёртая задача ЗО-7 предназначена для самостоятельного решения. Она войдёт также в следующую серию из четырёх задач, её авторское решение будет опубликовано в одном из будущих номеров журнала.

Предлагаем только школьникам присылать решение ЗО-7 по адресу [potential@potential.org.ru](mailto:potential@potential.org.ru), написав в теме ЗО-7, а в письме свои фамилию, имя, отчество, учебное заведение, населённый пункт. Фамилии школьников, приславших правильное решение до выхода номера журнала с решением этой задачи, будут опубликованы.

Правильное решение ЗО-4 прислал Родин А.Н. из города Минеральные Воды. Несмотря на то, что его решение содержит незначительные неточности (не сказано, что все колёса автомобиля должны быть ведущими), мы поздравляем первого победителя нашего конкурса!

**ЗО-4.** Оцените минимальное время, за которое автомобиль массой

$M = 1000$  кг и двигателем мощностью  $W = 1000$  кВт на ровной асфальтовой

горизонтальной дороге сможет разогнаться до скорости  $v = 100$  км/час, стартуя с нулевой начальной скоростью. Сопротивлением воздуха можно пренебречь. Коэффициент трения шин об асфальт 0,7.

**Решение.** Будем считать, что у автомобиля все его четыре колеса являются ведущими и что 100% механической мощности  $W = 100$  кВт на ведущем валу двигателя расходуется на увеличение кинетической энергии автомобиля. Максимальная горизонтальная составляющая силы взаимодействия автомобиля с дорогой равна  $F = M g k \approx 7000$  Н. Здесь  $k$  – это коэффициент трения (считаем  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>). Двигатель с заданной механической мощностью может разгонять автомобиль с ускорением  $a = F/M = gk = 7$  м/с<sup>2</sup> только от нулевой скорости до скорости  $v_1$ , равной

$$W/F = 10^5 \text{ Вт} / 7000 \text{ Н} \approx 14 \text{ м/с.}$$

На этот участок разгона требуется всего 2 секунды. От скорости  $v_1 = 14$  м/с до скорости  $v = 100/3,6$  м/с (100 км/час) ускорение автомобиля не остаётся постоянным, а всё время убывает. Поскольку максимальная мощность мотора задана, то на второй участок разгона потребуется время:

$$M \cdot (v^2 - v_1^2) / (2W) \approx 2,88 \text{ с.}$$

Следовательно, минимальное время, нужное для разгона автомобиля до скорости 100 км/ч, составит около 5 секунд ( $5 \approx 2 + 2,88$ ).

Для автомобилей с приводом только на передние или только на задние колёса это время будет больше, потому что максимальная горизонтальная составляющая силы взаимодействия ведущих колёс с дорогой у них меньше  $M g k$ , так как

вес автомобиля распределён на все колёса, а ведомые колёса разгонять автомобиль в рассматриваемой ситуации не могут.



**30-5.** Этот снимок (рис. 1) сделан из окна самолёта. Размеры самолёта: длина  $l$  примерно 60 метров, размах крыльев примерно 40 метров. Оцените высоту  $L$  полёта самолёта над облаками и диаметр  $D$  капелек, образующих облака.



Рис. 1

**Решение.** Угловой размер Солнца  $\varphi$  составляет около  $0,5^\circ$ , или  $0,0087$  рад. Тень самолёта воспроизводит его форму в деталях, составляющих, как

видно на фотографии, около  $1/10$  его ширины или длины, то есть на её общем виде ещё не сказывается «размытие», связанное с конечностью углового размера Солнца. Однако тени хвоста и двигателей самолёта уже не имеют чётких контуров. Следовательно, угловой размер этих частей самолёта лишь немного больше углового размера Солнца. Отсюда можно получить соотношение между величинами  $\varphi$ ,  $l$  и  $L$  и оценить из него высоту полёта самолёта над облаком по порядку величины:

$$\varphi = 0,0087 \text{ рад} \approx 0,1l/L.$$

Следовательно,  $L \approx 700 \text{ м}$ .



На фотографии вокруг тени самолёта видны цветные кольца. Глория, а именно так называют такое явление, возникает вследствие отражения падающего на капельки воды солнечного света обратно в направлении Солнца. Роль зеркал играют многочисленные группы из пар капелек воды, которые рас-

полагаются рядом друг с другом на одной линии с Солнцем.

Коэффициент преломления видимого света для всех цветов видимого света весьма близок к величине  $4/3$ . А это означает, что преломленные лучи фокусируются на расстоянии  $2R$  от центра капельки. В этом легко убедиться прямыми расчётами.

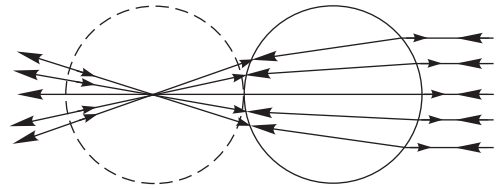


Рис. 2

Приведённая картинка (рис. 2) показывает ход лучей, падающих на каплю справа и дважды преломляющихся на границах раздела воды и воздуха. Если рядом с этой капелькой находится вторая и они расположены на одной линии с Солнцем, то внутри второй капельки лучи входят, практически не преломляясь. И на первой, и на второй поверхности капельки, показанной пунктиром, свет частично отражается, и отражённые лучи идут в точности в обратном направлении, то есть в сторону Солнца.

Хорошо «собираются» в изображение Солнца только лучи света, проходящие достаточно близко от центра первой капельки – параксиальные лучи. А остальные лучи, попавшие в первую капельку, рассеиваются под всевозможными большими углами и не участвуют в создании изображения Солнца. Диаметр  $d$  «эффективного» зеркала, эквивалентного по своему действию двум рядом расположенным капелькам,



получается меньше диаметра первой капельки  $D$  примерно в 4 раза. Кстати, это утверждение читатели могут просто проверить на практике, для этого можно воспользоваться лазерной указкой и двумя цилиндрическими пробирками, заполненными водой, – они будут имитировать капельки воды.

Свет, отражённый каждым таким маленьким круглым зеркальцем, испытывает дифракцию, при этом угловой размер видимого «отражения Солнца» может быть значительно больше  $0,5^\circ$ . Ширина изображения в «угловом выражении» складывается из собственного углового размера Солнца и из дифракционного расширения светового пучка, отражённого от зеркала. Для разных длин волн это дополнительное расширение имеет, естественно, разные величины. Оно тем больше, чем больше отношение  $\lambda/d$ . Первый минимум дифракционной картины, возникающий при отражении плоской волны, падающей на плоское круглое зеркало с диаметром  $d$ , для длины волны  $\lambda$  приходится на угол, для которого выполняется условие:

$$d \cdot \sin(\varphi_{\text{кругл}}) \approx 1,22 \lambda.$$

Если бы мы имели дело с одним плоским зеркалом, имеющим форму прямоугольника с одной очень длинной стороной и второй стороной шириной  $d$ , то в плоскости, перпендикулярной длинной стороне прямоугольника, это условие было бы таким:

$$d \cdot \sin(\varphi_{\text{прямоугольн}}) \approx \lambda.$$

Для малых углов, как известно, синусы и сами углы примерно одинаковы. На «минимумы» в распределении волн одной длины могут накладываться «ещё не минимумы» или «уже не минимумы» волн с

другими длинами. Это приводит к тому, что в видимом расширенном изображении Солнца по краям центрального яркого пятна появляется окрашивание. По мере удаления от центра картины сначала минимум в дифракционной картине достигается для сине-зелёной части спектра излучения Солнца, а жёлто-красные лучи ещё не достигают минимума. Поэтому края центрального светлого пятна окрашены в жёлто-красные оттенки. Для тех углов, на которые приходится минимум жёлто-красной части излучения, попадает излучение сине-зелёной части спектра вблизи первого максимума, который следует за первым минимумом. Поэтому на фотографии сразу за жёлто-красной границей центрального светлого пятна при внимательном рассмотрении можно заметить избыток коротковолновых цветов.

Первый и последующие максимумы в дифракционном распределении света имеют значительно меньшую интенсивность, чем интенсивность света в середине картины. Поэтому при сильной «подсветке», связанной с диффузным рассеянным светом, отражённым облаком, эти детали дифракционной картины незаметны.

Если считать, что диаметр оранжевой (жёлто-красной) окраски краёв пятна примерно на 30% больше длины тени самолёта и эти окрашенные места приходятся на минимум сине-зелёной части спектра с длинами волн около 500 нм, то можно составить соотношение, в которое входят: длина самолёта  $l$ , расстояние от него до облаков  $L$ , диаметр капель  $D$  и длина волны света  $\lambda$ :

$$2 \cdot 1,22 \cdot \lambda 4 / D = 1,3 \cdot l / L.$$

В итоге для диаметра капелек получается величина  $D \approx 44$  мкм.



**30-6.** Жёсткий титановый корпус подводной лодки имеет характерные размеры  $L = 150$  м в длину,  $D = 12$  м в диаметре. Толщина стенок корпуса примерно  $h = 10$  см. Оцените изменение длины лодки при её погружении на глубину  $H = 300$  м. Модуль Юнга для титана равен  $E = 1,1 \cdot 10^{11}$  Па.

**Решение.** При погружении на глубину 300 м лодка испытывает дополнительное сжимающее её давление воды, равное 3 МПа. Стенки корпуса упруго деформируются, сдерживая это давление. В поперечном сечении лодки, перпендикулярном направлению «нос – корма», суммарная сила, действующая со стороны воды на одну из половинок лодки, сдерживается силой, с которой вторая половинка корпуса давит на стенки первой половины. Эти силы равны по величине:

$$p_{\text{воды}} S_{\text{лодки}} = \frac{\pi D^2}{4} \rho g H = \\ = p_{\text{стен}} S_{\text{стен}} = p_{\text{стен}} \pi D h.$$

Деформация корпуса лодки приводит к уменьшению её длины на величину  $\Delta L$ . Давление, которое при этом развивается в титановых стенках, находится из соотношения:

$$p_{\text{стенки}} = E \frac{\Delta L}{L}.$$

Отсюда следует:

$$\Delta L = \frac{\rho g H D L}{4 E h} = \frac{36 \times 10^6 \times 150}{44 \times 10^9} \approx 0,12 \text{ м.}$$



Рис. 3

**30-7.** (Задача для самостоятельного решения) Пылинки в солнечном луче, пробивающемся сквозь неплотно закрытую штору, движутся со скоростями порядка 5 см/с. Мы их видим невооружёнными глазами, причём можем даже оценить их размеры, то есть пылинки видны в деталях (плоские, удлинённые, изогнутые). Докажите, что наблюдаемое движение таких пылинок не имеет никакого отношения к броуновскому движению (английское написание фамилии и имени: Brown, Robert (1773-1858)). Считать плотность частиц  $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.