

**ВСЕРОССИЙСКАЯ ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ ПО ФИЗИКЕ**  
**2025-2026 уч. год. Муниципальный этап. КАЛУЖСКАЯ ОБЛАСТЬ**

**11 КЛАСС Условия, ответы, решения, критерии оценки**

*Задание подготовлено профессором кафедры физики и математики КГУ им. К.Э. Циолковского М.С. Красиным*

**1. «Диссоциация озона» (10 баллов).** В закрытом сосуде находится озон (газ из трёхатомных молекул кислорода). Давление в сосуде равно 100 кПа. Температуру газа повышают на 20%. При этом третья часть всех молекул озона распадается на отдельные атомы, которые сразу же соединяются в двухатомные молекулы кислорода. Каким стало давление в сосуде? Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

**1. «Диссоциация озона». Ответ:** 140 кПа. **Краткое решение:**  $p_1 V = \nu_1 R T_1$ , (1)

$$T_2 = 1,2 T_1, \quad (2) \quad \nu_2 = \frac{2}{3} \nu_1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{3}{2} \nu_1 = \frac{7}{6} \nu_1 \quad (3)$$

$$p_2 V = \nu_2 R T_2 \quad (4)$$

$$p_2 = p_1 \frac{\nu_2 T_2}{\nu_1 T_1} = 100 \text{ кПа} \cdot \frac{7}{6} \cdot 1,2 = 140 \text{ кПа}$$

**1. «Диссоциация озона». Критерии оценки.**

Если дан только правильный ответ без обоснования, то ставить ноль баллов.

За учёт уравнения Менделеева-Клапейрона ставить по 1 баллу за каждое из двух соотношений,

За учёт соотношения (2) ставить 1 балл,

За учёт постоянства объёма (даже в неявном виде) ставить 1 балл.

За учёт того, что осталось две трети молекул озона ставить 1 балл.

За то, что из одной трети всех молекул озона получилось в полтора раза больше молекул кислорода ставить 2 балла.

За получение соотношения (3) ставить 1 балл.

За выход на расчётную формулу или получение всех необходимых для итогового расчёта данных при решении по частям ставить 1 балл.

За получение ответа ставить 1 балл.

**2. «Звёздный круговорот» (10 баллов).** В космическом пространстве обнаружили две звезды, обращающиеся по круговым орбитам вокруг общего центра масс. Одна звезда имеет красноватый цвет, другая голубоватый. Плоскости орбит звёзд расположены вдоль луча зрения земных наблюдателей. Благодаря этому красная звезда загораживает от нас синюю с периодом в 4 земных года. Исследуя спектры звёзд, удалось установить, что скорость орбитального движения голубой звезды в 4 раза меньше скорости красной. Наблюдая за видимыми колебаниями красной звезды, определили, что радиус её орбиты равен 6,4 а.е. Определите массу красной звезды. Справочные данные: можно считать, что гравитационная постоянная  $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ , астрономическая единица 1 а.е. = 150 млн км, масса Солнца равна  $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ , продолжительность земного года 365 дней.

**2. «Звёздный круговорот». Ответ**  $m_{\text{к}} = 1,28 \cdot 10^{31} \text{ кг}$ . **Решение.** Те, кто знает третий уточнённый закон Кеплера, могут им воспользоваться. Его можно применять

$$\text{либо в виде } \frac{T^2(m_{\Gamma} + m_{\text{к}})}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G} \quad (1), \quad \text{либо в виде } \frac{T_{\text{Земли}}^2 M_{\odot}}{r_{\text{Земли}}^3} = \frac{T^2(m_{\Gamma} + m_{\text{к}})}{r^3} \quad (2)$$

где  $r$  - расстояние между звёздами.  $r_{\text{Земли}} = 1$  а.е. – радиус орбиты Земли,  $T_{\text{Земли}} = 1$  год период обращения Земли вокруг Солнца.

Из этих формул получаем, что

$$m_{\Gamma} + m_{\text{к}} = \frac{4\pi^2}{G \cdot T^2} r^3 \quad (3.1) \quad \text{или} \quad m_{\Gamma} + m_{\text{к}} = M_{\odot} \left( \frac{T_{\text{Земли}}}{T} \right)^2 \left( \frac{r}{r_{\text{Земли}}} \right)^3 \quad (3.2)$$

Период обращения звёзд в двойной звёздной системе равен периоду движения каждой из звёзд по окружности вокруг общего центра масс, поэтому  $T = 4$  года (4)

Периоды обращения звёзд одинаковы, значит, они движутся по своим круговым орбитам с одинаковыми угловыми скоростями. Учитывая связь линейной скорости с угловой скоростью и с

радиусом, приходим к выводу, что радиус орбиты голубой звезды в 4 раза меньше радиуса орбиты красной, поэтому он равен 1,6 а.е. (5)

Двигаясь вокруг общего центра масс, обе звезды всегда находятся с противоположных сторон от этой точки, поэтому расстояние между звёздами равно 8 а.е. (6)

Если воспользоваться выражением (3.2), то получаем, что суммарная масса звёзд равна

$$m_{\Gamma} + m_{\text{К}} = M_{\text{С}} \left(\frac{1}{4}\right)^2 \left(\frac{8}{1}\right)^3 = 32M_{\text{С}} = 6,4 \cdot 10^{31} \text{ кг} \quad (7)$$

Учитывая, что расстояния от каждого из двух тел до общего центра масс обратно пропорциональны их массам, приходим к выводу, что масса красной звезды в 4 раза меньше массы голубой звезды и поэтому в 5 раз меньше суммарной массы. Получаем, что

$$m_{\text{К}} = 6,4M_{\text{С}} = 1,28 \cdot 10^{31} \text{ кг}$$

К этому же ответу можно прийти, используя формулу 3.1.

Только важно не забыть, что период надо выразить в секундах!

А расстояния в метрах! При этом не потребуется учитывать массу Солнца.

Тем, кто не знаком с третьим уточнённым законом Кеплера придётся вывести требуемые соотношения. Вывод может быть следующим.

Изобразим звёзды, обращающиеся вокруг общего центра масс. Проведём координатную ось параллельно прямой, проходящей через центры звёзд. Воспользовавшись уравнением для нахождения координаты центра масс системы точечных тел, находим, что

$$x_{\text{цм}} = \frac{m_{\text{К}} \cdot 0 + m_{\Gamma} r}{m_{\text{К}} + m_{\Gamma}} = \frac{m_{\Gamma} r}{m_{\text{К}} + m_{\Gamma}} \quad (9)$$

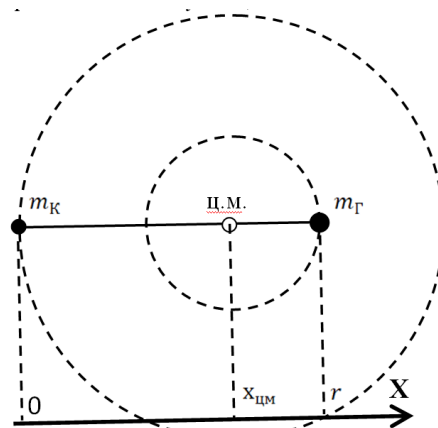
Заметим, что координата центра масс равна радиусу орбиты красной звезды  $r_{\text{К}} = x_{\text{цм}}$

Рассмотрим движение красной звезды. Согласно второму закону Ньютона  $F = m_{\text{К}} a$

$$G \frac{m_{\text{К}} m_{\Gamma}}{r^2} = m_{\text{К}} \frac{v^2}{r_{\text{К}}} \quad (10)$$

$$\text{Учтём, что } v = \frac{2\pi r_{\text{К}}}{T} \quad (11)$$

Подставив формулы (9) и (11) в (10), получаем (3.1). Далее решение см выше.



## 2. «Звёздный круговорот». Критерии оценки

За вывод, что периоды обращения звёзд равны ставить 1 балл

За вывод о соотношении между массами звёзд ставить 2 балла

За знание и запись формулы 3.1 или 3.2 или её вывод ставить 3 балла. Если формула только записана в общем виде и не скорректирована для нашего случая, то ставить только 1 балл

За определение расстояния между звёздами ставить 2 балла

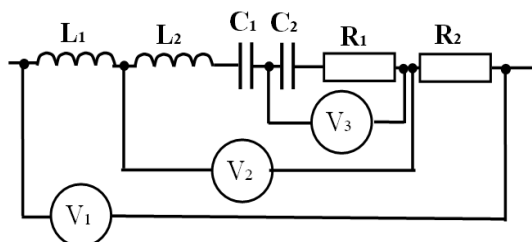
За нахождение массы красной звезды ставить 1 балл

За применение закона всемирного тяготения ставить 1 балл

За ошибку в преобразованиях оценку снизить на 2 балла. За вычислительную ошибку снизить оценку на 1 балл. Если сделанные ошибки не повлияли на радикальное изменение задачной ситуации, то за дальнейшие расчёты с неправильно найденными числовыми значениями оценки не снижать.

Если в третьем законе Кеплера принято расстояние равное радиусу орбиты красной звезды, то балла за определение её массы не ставить.

**3. «R-L-C цепочка» (10 баллов).** Перед Вами участок цепи с последовательно включенными катушками индуктивности, конденсаторами и резисторами. Участок включен в цепь переменного тока с частотой 50 Гц. Показания вольтметра  $U_1 = 220$ . Определите показания двух других вольтметров и силу тока на данном участке



цепи. Вольтметры считать идеальными. Активным сопротивлением проводов и катушек индуктивности можно пренебречь. Параметры приборов следующие:

$$L_1 = \frac{4}{\pi} \text{ Гн}, \quad L_2 = \frac{2}{\pi} \text{ Гн}, \quad C_1 = C_2 = \frac{10}{\pi} \cdot 10^{-5} \text{ Ф}, \quad R_1 = 200 \text{ Ом}, \quad R_2 = 100 \text{ Ом}$$

**3. «R-L-C цепочка».** Ответы:  $I = 0,44 \text{ А}$ ,  $U_2 = 88 \text{ В}$ ,  $U_3 \approx 98 \text{ В}$ . **Решение** Эквивалентная индуктивность последовательно включенных катушек равна сумме индуктивностей ( $L_1 + L_2$ ), (1) Эквивалентное сопротивление двух последовательно включенных резисторов равно сумме их сопротивлений ( $R_1 + R_2$ ). (2)

Эквивалентная ёмкость двух последовательно включенных одинаковых конденсаторов равна половине ёмкости одного  $0,5C_1$ . (3)

Поэтому полное сопротивление данного участка цепи можно рассчитать по формуле

$$Z_1 = \sqrt{(2\pi\nu(L_1 + L_2) - \frac{1}{2\pi\nu(0,5C_1)})^2 + (R_1 + R_2)^2} \quad (4)$$

Подставив числа получаем  $Z_1 = 500 \frac{\text{В}}{\text{А}}$ .

$$\text{Сила тока в цепи равна } I = \frac{U_1}{Z_1} = \frac{U_1}{\sqrt{(2\pi\nu(L_1 + L_2) - \frac{1}{2\pi\nu(0,5C_1)})^2 + (R_1 + R_2)^2}} = 0,44 \text{ А} \quad (5)$$

Напряжение на втором и третьем вольтметрах равны произведению силы тока на сопротивления соответствующих участков (6)

и поэтому

$$U_2 = U_1 \frac{\sqrt{(2\pi\nu(L_2) - \frac{1}{2\pi\nu(0,5C_1)})^2 + (R_1)^2}}{\sqrt{(2\pi\nu(L_1 + L_2) - \frac{1}{2\pi\nu(0,5C_1)})^2 + (R_1 + R_2)^2}} = U_1 \frac{200}{500} = 88 \text{ В} \quad (7)$$

$$U_3 = U_1 \frac{\sqrt{(\frac{1}{2\pi\nu(C_2)})^2 + (R_1)^2}}{\sqrt{(2\pi\nu(L_1 + L_2) - \frac{1}{2\pi\nu(0,5C_1)})^2 + (R_1 + R_2)^2}} = U_1 \frac{100\sqrt{5}}{500} \approx 98 \text{ В} \quad (8)$$

**3. «R-L-C цепочка».** Критерии оценки за пункты (1) – (6) ставить по 1 баллу.

За пункты (7) и (8) ставить по 2 балла. За вычислительную ошибку снижать оценку на 1 балл.

**4. «Медный стержень (10 баллов).** Медный стержень массой  $m$  и длиной  $L$  подвешен в горизонтальном положении на двух одинаковых тонких стальных практически невесомых пружинах жёсткостью  $k$ . Стержень находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ , направленной горизонтально, перпендикулярно стержню. В некоторый момент через стержень пропускают в течение очень короткого промежутка времени  $\tau$  импульс тока, силой тока  $I$ . За время прохождения тока проводник не успевает сколь существенно сместиться, но при этом приобретает скорость. **Вопрос 1.** Назовите силу, которая вызвала изменение импульса стержня в момент прохождения по нему тока? **Вопрос 2.** В каком направлении стержень приобрёл скорость? **Вопрос 3.** Через сколько времени скорость стержня станет равной нулю? **Вопрос 4.** Каким было наибольшее смещение стержня от положения равновесия, если известно, что оно было меньше деформации пружин в положении равновесия? Индуктивными эффектами в процессе движения стержня следует пренебречь.

**4. «Медный стержень. Ответы:** 1. Сила Ампера. 2. Вертикально вверх или вертикально вниз. 3.

$$t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2k}} \quad 4. x_{\text{макс}} = \frac{B \cdot L \cdot I \cdot \tau}{\sqrt{m \cdot 2k}}$$

**Решение:** Когда по проводнику проходит импульс тока на него действует сила Ампера. (1)

Учитывая горизонтальное расположение стержня, горизонтальное направление и перпендикулярность вектора магнитной индукции стержню, опираясь на правило левой руки,

понимаем, что стержень приобретает скорость в вертикальном направлении (вверх или вниз). (2)  
Величину начальной скорости стержня можно найти из закона изменения импульса.

$$m \cdot v = F \cdot \tau \quad (3) \quad \text{Тогда } v = \frac{F \cdot \tau}{m} = \frac{B \cdot L \cdot I \cdot \tau}{m} \quad (4)$$

Учитывая характер действия сил упругости, понимаем, что стержень после приобретения скорости и после завершения прохождения тока будет совершать колебания в вертикальной плоскости. (5)  
Для нахождения периода колебаний рассмотрим силы в положении равновесия

$$2kx_0 = mg \quad (6)$$

При смещении стержня от положения равновесия (для определённости будем считать, что он в начальный момент смещается вниз) на него действует результирующая сила

$$F_{\text{рез}} = 2k(x_0 + x) - mg \quad (7)$$

С учётом противоположности направлений действия силы и смещения получаем  $F_{\text{рез}x} = -2kx$ .

Замечаем квазиупругий характер действия результирующей силы и делаем вывод, что период колебаний стержня будет равен  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{2k}}$ .

До остановки стержня должно пройти четверть периода, поэтому  $t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2k}}$  (8)

#### Вариант 1 продолжения расчётов.

Максимальное смещение и максимальная скорость при гармонических колебаниях связаны соотношением:  $v_{\text{макс}} = \omega x_{\text{макс}}$ . (9.1)

где  $\omega$  - циклическая частота колебаний, связанная с периодом соотношением  $\omega = \frac{2\pi}{T}$

В момент остановки стержня смещение будет равно амплитуде колебаний, поэтому

$$x_{\text{макс}} = v_{\text{макс}} \frac{T}{2\pi} = \frac{B \cdot L \cdot I \cdot \tau}{m} \sqrt{\frac{m}{2k}} = \frac{B \cdot L \cdot I \cdot \tau}{\sqrt{m \cdot 2k}} \quad (10.1)$$

**Вариант 2 продолжения расчётов.** Взаимосвязь между максимальной скоростью движения (понимая, что это будет скорость стержня сразу после прохождения импульса тока, т.е.  $v_{\text{макс}} = v$ ) и максимальным смещением  $x_{\text{макс}}$  (равным максимальному растяжению пружины) можно вывести из закона сохранения энергии приравняв сумму энергий системы в момент приобретения скорости к сумме энергий в самом нижнем положении

$$2 \frac{kx_0^2}{2} + \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2} + mgx_{\text{макс}} = 2 \frac{k(x_0 + x_{\text{макс}})^2}{2} \quad (9.2)$$

Раскрывая скобки и учитывая (4) и (6), получаем

$$x_{\text{макс}} = \frac{B \cdot L \cdot I \cdot \tau}{\sqrt{m \cdot 2k}} \quad (10.2)$$

**4. «Медный стержень. Критерии оценки:** За каждый пункт (1) – (10) ставить 1 балл

**5. «Камень на ниточке»(10 баллов).** Между двумя штативами натянули нить и подвесили на ней стограммовый грузик и камень. Грузы расположили так, что участок нити между точками подвеса камня и груза оказался горизонтальным (см. рис.). Определите массу камня и оцените точность результата своих расчётов. Считайте, что относительная погрешность массы грузика равна 0,1 %. Для поиска решения Вы можете использовать линейку и карандаш.



**5. «Камень на ниточке».** Возможный ответ при выборе наибольших линейных размеров:  $(116,6 \pm 2,1)$  г, точность результата равна 1,8%.

**Решение.** Обозначим  $\alpha$  - угол наклона к горизонту нити, привязанной к грузу,  $\beta$  - угол наклона нити, привязанной к камню. Тогда условия равновесия камня и груза можно записать в виде

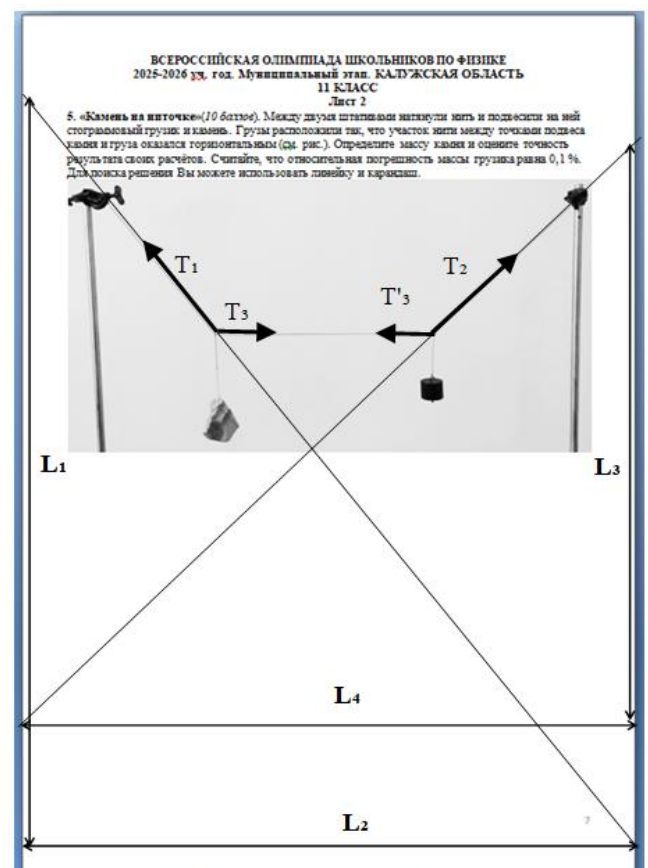
$$T_1 \cos \beta = T_3, \quad T_2 \cos \alpha = T'_3, \quad T_1 \sin \beta = Mg, \quad T_2 \sin \alpha = mg \quad (1)$$

$$\text{Учитывая, что } T_3 = T'_3, \text{ получаем, что масса камня равна } M = m \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} \quad (2)$$

Для нахождения тангенсов углов с наименьшей погрешностью проведём вдоль наклонных участков нитей линии от одного края листа заданий до другого (см. рис). Выражаем тангенсы как отношение сторон треугольника и получаем

$$M = m \frac{L_1 L_4}{L_2 L_3} \quad (3)$$

Измеряем значения и принимаем погрешность измерения равной 1 см.  $L_1 = 246 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$ ,  $L_2 = L_4 = 210 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$ ,  $L_3 = 211 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$  (Комментарии от составителей: 1) размеры на экземпляре, выданном участникам могли быть немного другими; 2) абсолютную погрешность измерений вполне можно взять и 2 мм; 3) именно в рассматриваемом варианте измерения линейных размеров, можно считать, что погрешность размеров  $L_2$  и  $L_4$  равна нулю, т.к. ширина листа  $A$ ; равна 210 мм с большой точностью, но здесь мы приводим расчёт для общего случая.) Самая маленькая относительная погрешность измерения длины  $\varepsilon_{T_1} = 0,4\%$  это значение более чем в 3 раза превосходит относительную погрешность значения массы грузика. Поэтому при оценке погрешности результата погрешностью массы грузика можно пренебречь. Погрешностью результатов



измерения линейкой пренебречь нельзя. Для оценки погрешности итогового результата воспользуемся методом верхней-нижней границы (В-Г границы)

$$M_{\text{ВГ}} = 100 \text{ г} \frac{247 \cdot 211}{210 \cdot 209} = 118,7 \text{ г}, \quad M_{\text{НГ}} = 100 \text{ г} \frac{245 \cdot 209}{212 \cdot 211} = 114,5 \text{ г}$$

При определении числа значащих цифр в ответе учитываем, что все величины, измеренные прямым методом, записаны с точностью до трёх значащих цифр, поэтому промежуточные результаты округляем до четырёх значащих цифр (т.е. с одной сомнительной). В итоговом ответе оставим тоже не более четырёх значащих цифр.

Погрешность равна  $\Delta M = 0,5(M_{\text{ВГ}} - M_{\text{НГ}}) = 0,5(118,7 - 114,5) \text{ г} = 2,1 \text{ г}$

Абсолютную погрешность всегда записывают с одной или двумя значащими цифрами.

Причём две значащие цифры оставляют только в двух случаях:

1) если первая значащая цифра 1 или 2;

2) если вторая значащая цифра 5.

Это делается для того, чтобы не была слишком большой погрешность округления.

Результат принимаем равным  $M = 0,5(M_{\text{ВГ}} + M_{\text{НГ}}) = 0,5(118,7 + 114,5) = 116,6 \text{ г}$

Округляем результат до минимального разряда погрешности и получаем ответ

$$M = 116,6 \text{ г} \pm 2,1 \text{ г}$$

Точность измерений характеризует относительная погрешность измерений. Граница относительной погрешности результата измерений равна  $\varepsilon_M = \frac{2,1}{116,6} 100 \% = 0,18 \%$

Обращаем внимание, что если треугольники, начерченные участниками, будут другими, то погрешность результата будет выше.

#### 5. «Камень на ниточке». Критерии оценки:

За получение соотношений (1) ставить по 0,5 балла за каждое из четырёх.

За получение формул (2) и (3) ставить по 1 баллу.

За измерение расстояний, необходимых для нахождения тангенсов углов ставить 1 балл, вне зависимости указаны результаты с погрешностью или без.

За запись искомого числового значения даже без указания погрешности измерений ставить 1 балл.

За идею о целесообразности измерения максимально возможных длин при расчёте тангенсов углов ставить 1 балл. Эта идея может быть не написана, но реализована, но **если стороны треугольников, измеренные и учтённые в расчётах участниками, будут меньше 10, то этот балл не ставить.**

За принятие значения абсолютной погрешности измерения длины равной **1 мм или 2 мм** ставить 0,5 балла.

За оценку границы абсолютной погрешности результата измерений ставить 1 балл.

За округление результата измерения в соответствии с правилом равенства минимальных разрядов в записи результата измерений и его погрешности ставить 0,5 балла.

За оценку точности результата (оценку относительной погрешности) измерений ставить 1 балл.

Если результат измерения оказался иным из-за того, что участник перепутал линейные размеры, то оценка за задачу не должна превышать 6 баллов.

Итоговый балл округлить до целого с избытком.

**Внимание, если погрешность записана с тремя или более значащими цифрами, то баллы за неё не ставить! Но оценки за последующие результаты не снижать**

Обращаем внимание, что результаты измерения участниками длин могут быть различны! Но отношения длин должны быть приблизительно такие, как в образце решения.