

Всероссийская олимпиада школьников по физике

Муниципальный этап

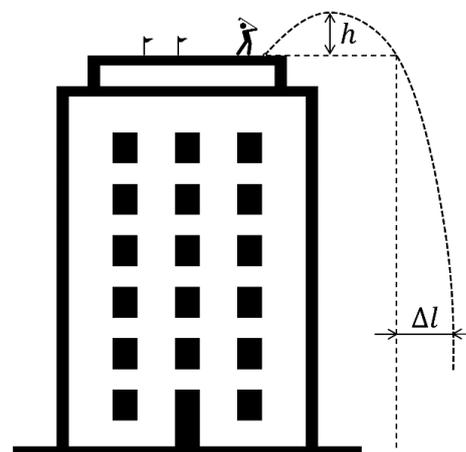
2023-2024 учебный год

11 класс

Время выполнения – 3 часа 50 минут (230 минут)

Максимальное количество баллов – 50

Задача 1. «Мини-гольф» (10 баллов). Рабочий кабинет теоретика Бага располагается в высотном здании, на крыше которого оборудована открытая площадка для игры в мини-гольф. Баг, решивший пройти несколько лунок в свой обеденный перерыв, выполнил неудачный удар и отправил мяч в полет – с крыши здания под углом к горизонту (см. рис.). Чтобы найти место падения мяча, Баг изучил параметры его полета и выяснил, что из-за сопротивления воздуха время подъема мяча до максимальной высоты и время падения до горизонтальной линии, проходящей через крышу здания, отличаются на τ . В момент пересечения указанной линии мячом горизонтальная составляющая его скорости была равна $v_{хг}$, а вертикальная составляющая была меньше на Δv вертикальной составляющей скорости мяча в момент отрыва от крыши здания. На какую высоту h от горизонтальной линии, проходящей через крышу здания, поднялся мяч, если после пересечения этой линии за время полета в горизонтальном направлении мяч прошел расстояние Δl ? Сила сопротивления движению мяча в воздухе прямо пропорциональна его скорости.



Решение

Сила сопротивления движения мяча в воздухе: $\vec{F}_{\text{сопр}} = k\vec{v}$.

1. Рассмотрим движение мяча вдоль оси OY .

За малый промежуток времени Δt изменение y -составляющей импульса мяча составит:

$$m\Delta v_y = (-mg - kv_y)\Delta t = -mg\Delta t - k\Delta h.$$

Когда мяч достигнет верхней точки своей траектории на высоте h , изменение его импульса составит:

$$-m\vartheta_{y0} = -mgt_1 - kh. \quad (1)$$

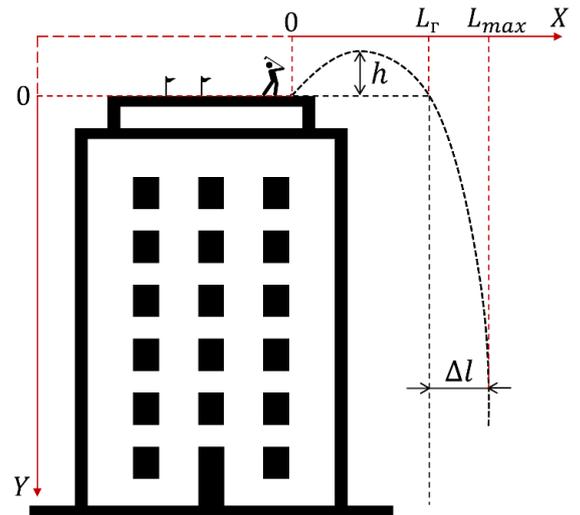
При движении мяча вниз от верхней точки траектории до пересечения горизонтальной линии, проходящей через крышу здания, изменение импульса составит:

$$m\vartheta_{y\Gamma} = mgt_2 - kh. \quad (2)$$

Складываем (1) и (2):

$$-m \underbrace{(\vartheta_{y0} - \vartheta_{y\Gamma})}_{\Delta\vartheta} = mg \underbrace{(t_2 - t_1)}_{\tau} -$$

$$2kh \Rightarrow h = \frac{m}{k} \cdot \frac{(g\tau + \Delta\vartheta)}{2}.$$



2. Рассмотрим движение мяча вдоль оси OX .

Изменение x -составляющей импульса мяча равно импульсу силы сопротивления воздуха:

$$m\Delta\vartheta_x = -k\vartheta_x\Delta t = -k\Delta l',$$

где $\Delta l'$ – малое перемещение мяча вдоль OX .

Когда мяч пересекает горизонтальную линию, проходящую через крышу здания, пройдя вдоль оси OX расстояние L_Γ , изменение импульса составит:

$$m\vartheta_{x0} - m\vartheta_{x\Gamma} = kL_\Gamma. \quad (3)$$

При максимальном удалении от здания L_{max} , когда x -скорость станет равна нулю, полное изменение импульса составит:

$$m\vartheta_{x0} = kL_{max}. \quad (4)$$

Вычитаем (3) из (4):

$$m\vartheta_{x0} - (m\vartheta_{x0} - m\vartheta_{x\Gamma}) = k \underbrace{(L_{max} - L_\Gamma)}_{\Delta l} \Rightarrow \frac{m}{k} = \frac{\Delta l}{\vartheta_{x\Gamma}} \Rightarrow h = \frac{\Delta l}{\vartheta_{x\Gamma}} \cdot \frac{(g\tau + \Delta\vartheta)}{2}.$$

Критерии оценивания (10 баллов)

1. Рассмотрено движение мяча вдоль оси OY :

а. Приведен закон изменения y -компоненты импульса мяча – **2 балла**.

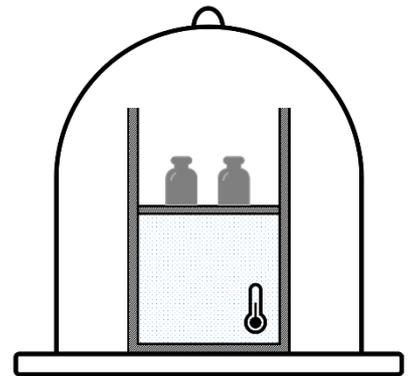
б. Записано изменение y -компоненты импульса мяча при движении от точки отрыва до верхней точки траектории – **1 балл**.

с. Записано изменение y -компоненты импульса мяча при движении от верхней точки траектории до пересечения горизонтальной линии, проходящей через крышу здания – **1 балл**.

2. Рассмотрено движение мяча вдоль оси OX :

- а. Приведен закон изменения x -компоненты импульса мяча – **2 балла**.
- б. Записано изменение x -компоненты импульса мяча при движении от точки отрыва до пересечения горизонтальной линии, проходящий через крышу здания – **1 балл**.
- с. Записано полное изменение x -компоненты импульса мяча – **1 балл**.
3. Получена итоговая формула для высоты h – **2 балла**.

Задача 2. «Законы термодинамики» (10 баллов). Экспериментатор Глюк изучал законы термодинамики, используя следующую экспериментальную установку: теплоизолированный сосуд цилиндрической формы с поршнем и встроенным термометром, в который был закачен 1 моль одноатомного идеального газа, находился в вакуумной камере, так что давление вне сосуда было равно нулю. Поршень в сосуде удерживался в неподвижном состоянии двумя гирями одинаковой массы (см. рис.). Убрав одну гирю с поршня и через некоторое время вернув ее на место, Глюк заметил изменение температуры газа в сосуде. На сколько изменилась температура газа в сосуде, если перед началом эксперимента газ имел комнатную температуру, равную T_k . Поршень вдоль стенок сосуда скользит без трения.



Решение

Первое начало термодинамики для теплоизолированного сосуда:

$$\Delta U + A = 0. \quad (1)$$

Начальное давление газа в сосуде: $p_1 = \frac{2mg}{S}$. Давление газа в сосуде после того, как Глюк убрал одну гирю: $p_2 = \frac{mg}{S} \Rightarrow p_2 = \frac{p_1}{2}$. Окончательное давление газа, когда Глюк вернул вторую гирю на место: $p_3 = p_1$.

При снятой гире для 1 моль идеального газа в сосуде с учетом (1) получим:

$$C_V(T_k - T_2) = p_2(V_2 - V_1).$$

Здесь T_k – первоначальная температура газа в сосуде, C_V – молярная теплоемкость газа при $V = const$. При этом $p_1 V_1 = RT_k$, $p_2 V_2 = RT_2$. Тогда:

$$C_V T_k + \frac{p_1}{2} V_1 = p_2 V_2 + C_V T_2,$$

$$T_2 = \frac{C_V + \frac{R}{2}}{C_V + R} \cdot T_k. \quad (2)$$

Аналогично после того, как Глюк вернул вторую гирию на поршень, получим:

$$C_V(T_2 - T_3) = p_3(V_3 - V_2) \Rightarrow C_V T_2 + 2p_2 V_2 = p_3 V_3 + C_V T_3,$$

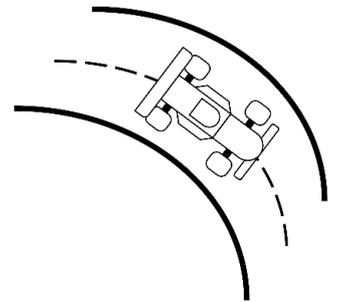
$$T_3 = \frac{C_V + 2R}{C_V + R} \cdot T_2 \stackrel{(2)}{\Rightarrow} T_3 = \frac{(C_V + 2R)(C_V + \frac{R}{2})}{(C_V + R)^2} \cdot T_K. \quad (3)$$

Вспользуемся формул для теплоемкости одноатомного идеального газа при $V = const$: $C_V = \frac{3}{2}R \Rightarrow T_3 = \frac{28}{25} T_K$, тогда изменение температуры газа в сосуде: $\Delta T = T_3 - T_K = \frac{3}{25} T_K = 0.12 T_K$.

Критерии оценивания (10 баллов)

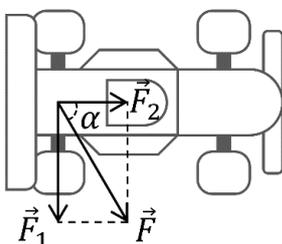
1. Приведено первое начало термодинамики для теплоизолированного сосуда – **1 балл**.
2. Приведены значения давлений в сосуде: начального, без одной гири и конечного – **2 балла**.
3. Рассчитана температура газа в сосуде без одной гири на поршне – **3 балла**.
4. Рассчитана температура газа в сосуде после того, как Глюк вернул вторую гирию на поршень – **3 балла**.
5. Определено изменение температуры газа в сосуде – **1 балл**.

Задача 3. «Тренировочный заезд» (10 баллов). Пилот гоночного болида начинает тренировочный заезд на трек с постоянным касательным ускорением $a = 2 \text{ м/с}^2$. У болида ведущими являются задние колеса, а вот нагрузка при движении равномерно распределяется между задней и передней осями. Масса болида $m = 1 \text{ т}$ и центр масс располагается очень низко. Гоночный трек выполнен в форме плоского кольца радиуса $R = 1 \text{ км}$. В течение какого времени пилот сможет удержать болид на гоночном кольце, если коэффициент трения скольжения шин об асфальтное покрытие трека составляет $\mu = 0.5$.



Решение

Рассмотрим силы, действующие на гоночный болид в момент времени, когда он должен сорваться с трека. В этот момент силы трения, действующие на задние колеса, достигают своего максимального значения: $F = \mu \frac{m}{2} g. \quad (1)$



Вектор силы трения \vec{F} направлен под углом α к вектору скорости (см. рис.), представляя собой векторную сумму нормальной $F_1 = F \sin \alpha$ и касательной

$F_2 = F \cos \alpha$ компонент. Согласно второму закону Ньютона:

$$F_1 = \frac{m}{2} \cdot \frac{v^2}{R} = \frac{m}{2} \cdot \frac{(at)^2}{R}, F_2 = ma. \quad (2)$$

Используя выражения (1) и (2), запишем квадрат модуля силы трения \vec{F} :

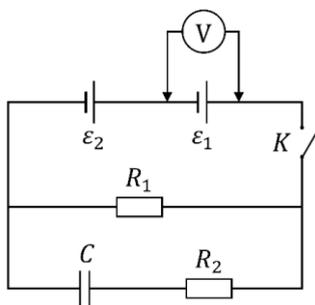
$$F^2 = F_1^2 + F_2^2 \Rightarrow \left(\mu \frac{m}{2} g\right)^2 = \left(\frac{m}{2} \cdot \frac{a^2 t^2}{R}\right)^2 + (ma)^2,$$

$$t = \frac{\sqrt{R}}{a} \cdot \sqrt[4]{\mu^2 g^2 - 4a^2} = 26.6 \text{ с.}$$

Критерии оценивания (10 баллов)

1. Приведен модуль силы трения, действующей на задние колеса, в момент времени, когда болит должен сорваться с трека – **1 балл**.
2. Показано, что сила трения имеет две компоненты: нормальную и касательную – **2 балла**.
3. Определены модули нормальной и касательной компонент силы трения – **2 балла**.
4. Использована формула для скорости болида, движущегося с постоянным касательным ускорением – **1 балла**.
5. Получена итоговая формула для времени, в течение которого пилот сможет удержать болид на гоночном кольце – **3 балла**.
6. Получено правильное значение для времени с указанием единиц измерения – **1 балл**.

Задача 4. «Идеальный вольтметр» (10 баллов). Ученик Миша изучал



тему «Электрическая цепь и ее составные части». Для этого он собрал цепь по схеме, представленной на рис. Цепь содержала конденсатор емкостью C , два резистора с сопротивлениями $R_1 = 2.8 \text{ Ом}$ и $R_2 = 1.12 \text{ Ом}$, две последовательно включенные батарейки с одинаковым ЭДС $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ и разными внутренними сопротивлениями $r_1 = 0.1 \text{ Ом}$ и

$r_2 = 1.1 \text{ Ом}$, ключ K . В качестве измерительного прибора выступал идеальный вольтметр. Сначала, не замыкая ключа K , Миша подключил вольтметр к клеммам батареи ε_1 . Вольтметр показал значение для напряжения $U_0 = 8 \text{ В}$. Затем Миша присоединил вольтметр к клеммам батареи ε_2 и замкнул ключ K . Что показал вольтметр сразу после замыкания ключа K и после того, как ток в цепи установился?

Решение

Так как вольтметр идеален, то до замыкания ключа он показывает значение ЭДС батареи: $U_0 = \varepsilon_1 = \varepsilon = 8 \text{ В}$. Сразу после замыкания ключа сила тока, текущего в цепи:

$$I_1 = \frac{2U_0}{r_1 + r_2 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = 0.8 \text{ А},$$

и напряжение на второй батарее:

$$U_1 = \varepsilon - I_1 r_2 = 8 \text{ В} - (0.8 \text{ А}) \cdot (1.1 \text{ Ом}) = -0.8 \text{ В}.$$

Когда конденсатор зарядится, ток будет течь только через сопротивление R_1 :

$$I_2 = \frac{2U_0}{r_1 + r_2 + R_1} = 4 \text{ А},$$

а напряжение на второй батарее:

$$U_2 = \varepsilon - I_2 r_2 = 8 \text{ В} - (4 \text{ А}) \cdot (1.1 \text{ Ом}) = 3.6 \text{ В}.$$

Видим, что напряжение на батарее в зависимости от схемы включения может менять знак.

Критерии оценивания (10 баллов)

1. Определено ЭДС ε_1 – **1 балла**.
2. Определен ток в цепи сразу после замыкания ключа – **2 балла**.
3. Установлено показания вольтметра после замыкания ключа – **2 балла**.
4. Определено установившееся в цепи после замыкания ключа значение тока – **2 балла**.
5. Установлено показания вольтметра после того, как ток в цепи установился – **2 балла**.
6. Показано, что напряжение на батарее в зависимости от схемы включения может менять знак – **1 балл**.

Задача 5 (псевдоэксперимент). «Научный проект» (10 баллов). Витя со своим одноклассником Димой готовились к выступлению на научном региональном форуме школьников. Научный проект одноклассников был посвящен процессу растворения некоторого вещества в воде. Экспериментируя, Витя и Дима погружали в воду массой m вещество такой же массы и установили, что вещество обладает следующими свойствами: 1. при растворении в воде вещество поглощает энергию λ на каждый килограмм, причем $\frac{\lambda}{c} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, где c – удельная теплоемкость вещества, равная теплоемкости воды и не меняющаяся при растворении; 2. концентрация α вещества в воде, определяемая как отношение массы

растворенного вещества к массе растворителя $\alpha = \frac{m_{\text{р.вещ}}}{m_{\text{раств}}}$, в насыщенном растворе зависит от температуры $t^\circ\text{C}$ (см. таблицу).

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
α	0.10	0.11	0.13	0.15	0.18	0.22	0.28	0.36	0.46	0.64	1.00

В проведенном одноклассниками эксперименте начальная температура вещества была $+200^\circ\text{C}$, воды – 0°C . Определите установившиеся температуру $t_{\text{уст}}$ и концентрацию $\alpha_{\text{уст}}$ получившегося раствора. Тепловыми потерями и испарением пренебечь.

Решение

Из закона сохранения энергии следует: $Q_{\text{раств}} = Q_1 + Q_2$ (1), где $Q_{\text{раств}}$ – теплота, которая пошла на растворение вещества, Q_1 – выделившаяся при остывании воды теплота (возможно $Q_1 < 0$), Q_2 – выделившаяся при остывании вещества теплота. Поскольку масса вещества $m_{\text{вещ}} = m$, масса воды $m_{\text{воды}} = m$, а масса растворенного вещества $m_{\text{р.вещ}} = \alpha m_{\text{раств}} = \alpha m_{\text{воды}} = \alpha m$, то:

$$\begin{aligned} Q_{\text{раств}} &= \lambda m_{\text{р.вещ}} = \lambda \alpha m, \\ Q_1 &= cm_{\text{воды}}(t_1 - t') = cm(t_1 - t'), \\ Q_2 &= cm_{\text{вещ}}(t_2 - t') = cm(t_2 - t'). \end{aligned}$$

Здесь t' – температура получаемого раствора. Подставим теплоты $Q_{\text{раств}}$, Q_1 , Q_2 в закон сохранения энергии (1) и выразим концентрацию α :

$$\lambda \alpha m = cm(t_1 + t_2 - 2t') \Rightarrow \boxed{\alpha(t') = \frac{c}{\lambda}(t_1 + t_2 - 2t')}. \quad (2)$$

Выражение (2), зависимость $\alpha(t')$, представляет собой уравнение прямой:

$$\alpha(+200^\circ\text{C}) = 1, \alpha(0^\circ\text{C}) = 1.$$

Уравнение зависимости $\alpha(t')$ решается графически, для этого нужно построить графики зависимостей $\alpha(t^\circ\text{C})$ по таблице (см. условие задачи) и $\alpha(t')$, и по точке пересечения определяем:

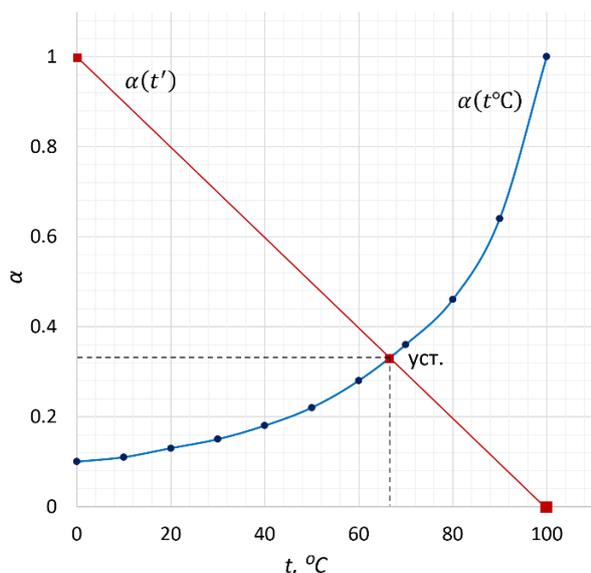
$$t_{\text{уст}} \approx 67^\circ\text{C}, \alpha_{\text{уст}} \approx 0.33.$$

Критерии оценивания (10 баллов)

1. Приведен закон сохранения энергии для процесса растворения вещества в воде – **1 балл**.

2. Записаны выражения для:

а. теплоты, которая пошла на растворение вещества – **1 балл**,



в. теплоты, выделившейся при остывании воды (отмечена возможность $Q_1 < 0$) – **1 балл**,

с. теплоты, выделившейся при остывании вещества – **1 балл**.

3. Получена зависимость концентрации α раствора от температуры получаемого раствора t' – **2 балла**.

4. Графически найдены установившиеся температуры $t_{уст}$ и концентрации $\alpha_{уст}$ раствора:

а. Построен график зависимости концентрация α вещества в насыщенном водном растворе от температуры $t^\circ\text{C}$ по представленным данным с указанием всех экспериментальных точек – **1 балл**;

б. Координатные оси имеют равномерный масштаб, корректно расставлены значения на осях, оси подписаны с указанием единиц измерения – **1 балл**;

с. Построена зависимость концентрации α раствора от температуры получаемого раствора t' – **1 балл**;

д. Получены численные значения $t_{уст} \approx 67^\circ\text{C}$ и $\alpha_{уст} \approx 0.33$ по точке пересечения зависимостей $\alpha(t')$ и $\alpha(t^\circ\text{C})$ – **1 балл**.