

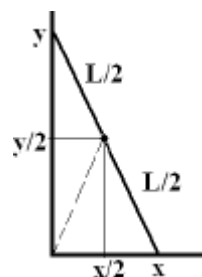
Задание 1

1. Стержень длина которого $L = 1$ метр касается своими концами вертикальной стенки и горизонтального пола. Он движется, оставаясь всё время в одной и той же вертикальной плоскости, без отрыва от стенки и пола. В некоторый момент времени модуль скорости верхнего конца стержня равен 1 м/с, а нижнего конца – 2 м/с. Найдите модуль скорости середины стержня в этот момент, а также направление этой скорости относительно горизонтали. На какой высоте от пола находится в этот момент верхний конец стержня?

Максимум за задачу 10 баллов.

Возможное решение

Пусть x и y – расстояния от нижнего и верхнего концов стержня до вершины прямого угла, образуемого стенкой и полом. Тогда координаты середины стержня $x/2$ и $y/2$, а горизонтальная и вертикальная составляющая скорости середины стержня равны по модулю половинам модулей скоростей нижнего и верхнего концов стержня $u_x = 1$ м/с $u_y = 0,5$ м/с.



Модуль скорости середины стержня находится при помощи теоремы Пифагора $u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} = \sqrt{1,25}$. Вектор скорости середины стержня расположен в плоскости движения стержня и направлен от стены и к полу. Для угла α , который этот вектор составляет с горизонталью, находим: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{u_y}{u_x} = 0,5$, то есть $\alpha = \operatorname{arctg}(0,5)$.

Найдём угол между стержнем и стенкой в рассматриваемый момент времени. Легко доказать, что середина стержня движется по окружности радиусом $L/2$. Этот радиус изображён на рисунке штриховой линией. Вектор скорости середины стержня перпендикулярен радиусу, и поэтому угол между стержнем и стенкой равен определённому выше углу α (тангенс этого угла можно найти из условия неизменности длины стержня - это альтернативный способ получения ответа для угла α).

Всероссийская олимпиада школьников
Физика. 2024–2025 уч. г. Муниципальный этап. 11 класс

Так как $H = L \cos \alpha$, то $H = \frac{2L}{\sqrt{5}} =$

Критерии оценивания

Баллы	Правильность (ошибочность) решения
10	Полное верное решение
2	Координаты середины стержня связаны с координатами его концов
2	Найдены скорости $u_x = 1$ м/с $u_y = 0,5$ м/с.
2	Найдена скорость $u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} = \sqrt{1,25}$
2	Найден угол $\alpha = \arctg(0,5)$
2	Найдена высота $H = \frac{2L}{\sqrt{5}}$
0	Решение отсутствует

Задание 2

Два школьника сидят в санках-ледянках, которые покоятся на гладкой горизонтальной поверхности замёрзшего озера, и держат в руках концы длинной невесомой нерастяжимой верёвки. Они начинают «выбирать» верёвку руками и таким образом едут навстречу друг другу. В некоторый момент сила натяжения выпрямленной (то есть не провисающей) между школьниками верёвки становится равной нулю. После этого они продолжают «выбирать» верёвку так, что она движется относительно первого физика со скоростью $u_1 = 1$ м/с, а относительно второго – со скоростью $u_2 = 0,6$ м/с. Масса первого школьника $m_1 = 60$ кг, а масса второго школьника $m_2 = 78$ кг. Найдите модуль скорости каждого физика и горизонтального участка верёвки относительно озера.

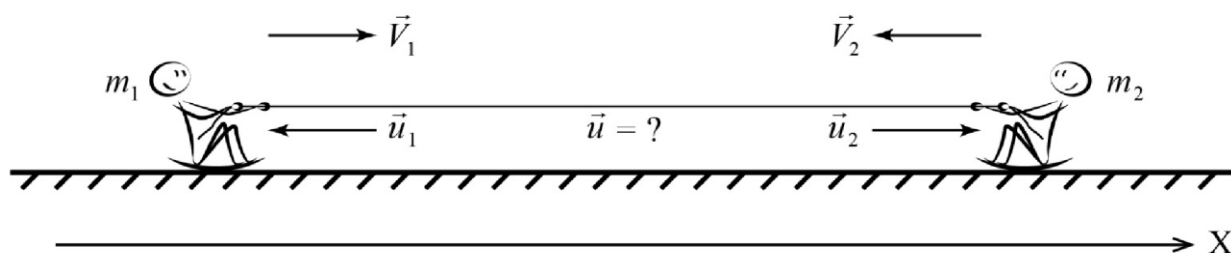
Максимум за задачу 10 баллов.

Возможное решение

Пусть V_1 и V_2 - скорости первого и второго физиков относительно озера, u_1 и u_2 -

скорости верёвки относительно физиков, u - скорость верёвки относительно озера.

Запишем закон сохранения импульса системы в векторном виде:



$$m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2 = 0 \quad (1)$$

Запишем для верёвки закон сложения скоростей:

$$\vec{u} = \vec{u}_1 + \vec{V}_1 \quad (2)$$

$$\vec{u} = \vec{u}_2 + \vec{V}_2 \quad (3)$$

Всероссийская олимпиада школьников
Физика. 2024–2025 уч. г. Муниципальный этап. 11 класс

Запишем теперь закон сложения скоростей (2) и (3) в проекции на ось X (учтём, что направление u заранее не известно):

$$u_x = -u_1 + V_1 \quad (4)$$

$$u_x = u_2 - V_2 \quad (5)$$

Из (1) следует, что $m_1 V_1 - m_2 V_2 = 0$. Тогда с учётом (4) и (5) получаем:

$$V_1 = \frac{m_2(u_1 + u_2)}{m_1 + m_2} \approx 0,9 \text{ м/с}; \quad V_2 = \frac{m_1(u_1 + u_2)}{m_1 + m_2} \approx 0,7 \text{ м/с}; \quad u = |V_1 - u_1| \approx$$

0,1 м/с.

Критерии оценивания

Баллы	Правильность (ошибочность) решения
10	Полное верное решение
2	Записана формула $m_1 V_1 - m_2 V_2 = 0$
1,5	Записана формула $u_x = -u_1 + V_1$.
1,5	Записана формула $u_x = u_2 - V_2$
1,5	Записана формула $V_1 = \frac{m_2(u_1 + u_2)}{m_1 + m_2} \approx 0,9 \text{ м/с}$
1,5	Записана формула $V_2 = \frac{m_1(u_1 + u_2)}{m_1 + m_2} \approx 0,7 \text{ м/с};$
2	Записана формула $u = V_1 - u_1 \approx 0,1 \text{ м/с}.$
0	Решение отсутствует

Задание 3

При нагревании трёх молей гелия давление p газа изменялось прямо пропорционально его объёму V ($p = aV$, где a – некоторая неизвестная константа). На сколько градусов поднялась температура гелия, если газу передали количество теплоты $Q = 300$ Дж?

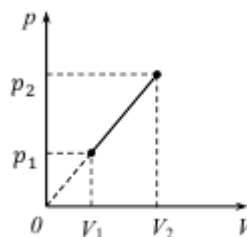
Максимум за задачу 10 баллов.

Возможное решение

Запишем уравнения Клапейрона-Менделеева для начального и конечного состояний газа:

$$p_1 V_1 = \nu R T_1,$$

$$p_2 V_2 = \nu R T_2.$$



Совершенная газом работа численно равна площади под графиком (см. рис.): $A = \frac{1}{2}(p_2 V_2 - p_1 V_1) = \frac{1}{2} \nu R \Delta T$. Из первого начала термодинамики следует $Q = \Delta U + A = \frac{3}{2} \nu R \Delta T + \frac{1}{2} \nu R \Delta T = 2 \nu R \Delta T$, значит

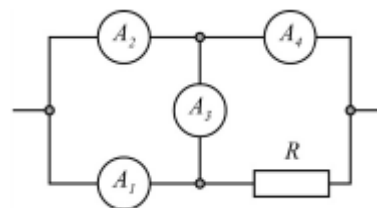
$$\Delta T = \frac{Q}{2 \nu R} = 6 \text{ К}$$

Критерии оценивания

Баллы	Правильность (ошибочность) решения
10	Полное верное решение
2	Записаны формулы $p_1 V_1 = \nu R T_1$, $p_2 V_2 = \nu R T_2$.
3	Записана формула $A = \frac{1}{2} \nu R \Delta T$
1	Записана формула $Q = \Delta U + A$
2	Записана формула $\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$
2	Записана формула $\Delta T = \frac{Q}{2 \nu R} = 6 \text{ К}$;
0	Решение отсутствует

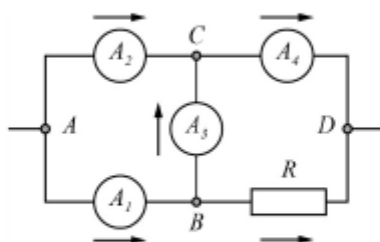
Задание 4

Электрическая цепь состоит из резистора с сопротивлением R и четырёх одинаковых амперметров с внутренними сопротивлениями r . Показания амперметра A_1 равны $I_1 = 3\text{ А}$ и A_2 равны $I_2 = 5\text{ А}$. Найдите отношения сопротивлений R/r .



Возможное решение

На рисунке стрелками указаны выбранные нами положительные направления токов в ветвях цепи.



Поскольку в контуре ACB отсутствуют источники ЭДС, то

$$I_2 r = I_3 r + I_1 r \Rightarrow I_3 = I_2 - I_1 = 2\text{ А}.$$

Запишем закон сохранения электрического заряда для узла B :

$$I_1 = I_3 + I_R \Rightarrow I_R = I_1 - I_3 = 1\text{ А}.$$

Аналогично находим ток $I_4 = I_2 + I_3 = 7\text{ А}$.

Для контура CDB , в котором также отсутствуют источники ЭДС:

$$I_3 r + I_4 r = I_R R \Rightarrow \frac{R}{r} = \frac{I_3 + I_4}{I_R} = 9.$$

Критерии оценивания

1. $I_2 r = I_3 r + I_1 r$ 2 балла
2. $I_1 = I_3 + I_R$ 2 балла
3. $I_4 = I_2 + I_3$ 2 балла
4. $I_3 r + I_4 r = I_R R$ 2 балла
5. $\frac{R}{r} = 9$ 2 балла

Максимум за задачу 10 баллов.

Критерии оценивания

Баллы	Правильность (ошибочность) решения
10	Полное верное решение
2	Записаны формулы $p_1 V_1 = \nu R T_1$, $p_2 V_2 = \nu R T_2$.
3	Записана формула $A = \frac{1}{2} \nu R \Delta T$
1	Записана формула $Q = \Delta U + A$

Всероссийская олимпиада школьников
Физика. 2024–2025 уч. г. Муниципальный этап. 11 класс

2	Записана формула $\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$
2	Записана формула $\Delta T = \frac{Q}{2 \nu R} = 6\text{K};$
0	Решение отсутствует

Задание 5

Эффект Холла. Электроны являются носителями тока в металлах и полупроводниках n-типа. Если образец с током (в данном случае прямоугольный кусочек плёнки полупроводника n-типа) помещён в магнитное поле и через него протекает электрический ток, то на движущиеся электроны действует сила Лоренца $F = evB$, перпендикулярная скорости $\vec{v}$ электрона и вектору $\vec{B}$ магнитной индукции (рис. 1).

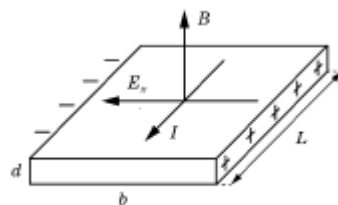


Рис. 1

Здесь v – средняя скорость дрейфа электронов, связанная с проходящим током I и прямо пропорциональная напряженности электрического поля $\vec{E}$ в направлении этого тока: $v = \mu E$, где коэффициент пропорциональности μ называется подвижностью электронов.

Из-за действия на электроны силы Лоренца (на рисунке она направлена в сторону левой грани), происходит разделение зарядов и появляется поперечное электрическое поле с напряженностью E_x . Возникновение этого поля при протекании тока в образце, помещенном в магнитное поле, называют эффектом Холла. Перемещение электронов в направлении левой грани прекращается, когда силу Лоренца уравнивает электрическая сила eE_x :

$$evB = eE_x.$$

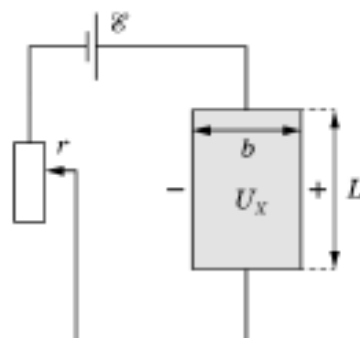
В установившемся режиме напряжённость поперечного электрического поля $E_x = vB$.

Ниже описан эксперимент, в котором эффект Холла используется для исследования свойств полупроводника. Ток создаёт источник с ЭДС $\mathcal{E} = 10$ В и малым внутренним сопротивлением. Величина магнитной индукции $B = 1,0$ Тл. Для изменения тока применяют переменный резистор, а вольтметром измеряют напряжение U_x между боковыми гранями в направлении, перпендикулярном магнитному полю и направлению протекающего тока.

Рис. 2

Размеры полупроводникового образца: толщина $d = 1,0$ мкм, ширина $b = 5,0$ мм, длина $L = 1,0$ см. Заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

В таблице представлена зависимость U_x от сопротивления r переменного резистора.



r , кОм	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,0
U_x , В	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,5

Задание

- Выразите U_x через силу тока I в образце, концентрацию n электронов проводимости и физические величины, приведенные в описании эксперимента ($\mathcal{E}$, B , d , b , L , e).
- Выразите сопротивление R и удельное сопротивление ρ образца через его размеры, подвижность μ и концентрацию n электронов проводимости.
- Используя уравнения, полученные в п.п. 1, 2, выразите U_x через концентрацию n и подвижность μ электронов проводимости, сопротивление r и физические величины, приведенные в описании эксперимента.
- Используя выражение, полученное в п. 3, при помощи графического анализа экспериментальных данных определите для исследуемого полупроводника:
 - концентрацию n электронов проводимости;
 - их подвижность μ ;
 - удельное сопротивление ρ .

Опишите выбранный для этого способ обработки данных.

Возможное решение (С. Кармазин).

- Выразим U_x через силу тока I в образце. Заметим, что при скорости дрейфа v за единицу времени через сечение образца bd проходит заряд электронов

проводимости из объёма vbd , что при концентрации n электронов проводимости создаёт силу тока $I = envbd$. Для разности потенциалов $U_x = bvB$, поэтому

$$U_x = \frac{IB}{end}. \quad (1)$$

2. Выразим сопротивление R образца между гранями, отстоящими друг от друга на расстоянии L , через подвижность μ и концентрацию n электронов проводимости. Так как $v = \mu E$, где $E = U/L$, где U – напряжение между сечениями бруска, то скорость дрейфа электронов $v = \mu U/L$. Поскольку сила тока $I = envbd = \frac{en\mu Ub d}{L}$, то из равенства $R = U/I$ имеем

$$R = \frac{L}{en\mu Ub}. \quad (2)$$

Соответственно, для удельного сопротивления получим

$$\rho = \frac{1}{en\mu} \quad (3)$$

3. Запишем закон Ома для замкнутой цепи $E = \frac{I}{R+r}$, где R сопротивление образца.

Подставляя в это уравнение выражение $I = \frac{U_x end}{B}$, следующее из (1), и выражение (2) для R , получим

$$r + R = \frac{EB}{U_x end} \text{ или } \frac{EB}{U_x} = end \cdot r + \frac{L}{\mu B} \quad (4)$$

Мы получили, что обратное напряжение Холла линейно зависит от сопротивления переменного резистора r . Это позволяет применить графическую обработку (4).

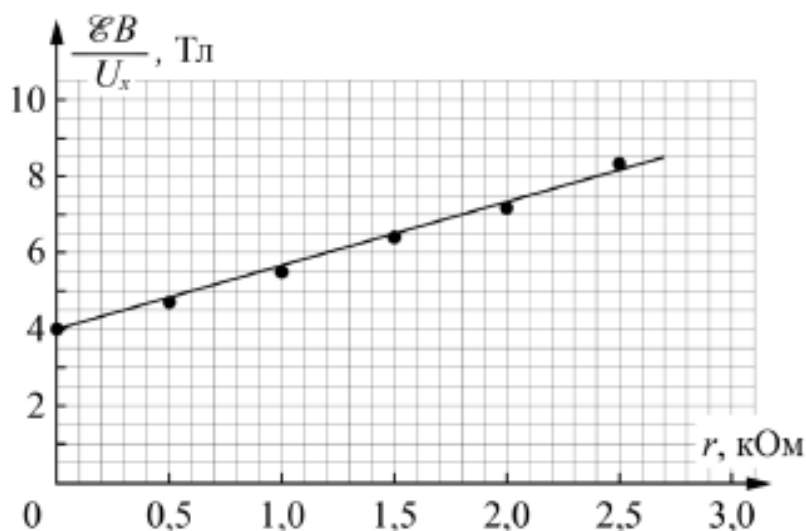
По угловому коэффициенту end можно найти концентрацию n , а по свободному члену $\frac{L}{\mu B}$ – подвижность μ .

Таблицу из условия преобразуем к виду:

r , кОм	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
$\mathcal{E}B/U_x$, Тл	4,0	4,8	5,6	6,3	7,1	8,3

ГР

Наносим на график с осями $\frac{\mathcal{E}B}{U_x}$ и r точки, отвечающие измерениям, и проводим наиболее близкую к ним прямую.



Для нашей прямой получаем $\frac{L}{\mu b} = 4,1$ Тл, откуда

$$\mu = \frac{1,0 \cdot 10^{-2}}{5,0 \cdot 10^{-3} \cdot 4,1} \left(\frac{\text{м}^2}{\text{с} \cdot \text{В}} \right) = 4,9 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{см}^2}{\text{с} \cdot \text{В}} \right).$$

Угловой коэффициент $\text{end} = \frac{8,2 - 4,0}{2,5 \cdot 10^5} \left(\frac{\text{Тл}}{\text{Ом}} \right) \approx 1,7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{Тл}}{\text{Ом}} \right)$, откуда

$$n = \frac{1,7 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,0 \cdot 10^{-6}} \text{ м}^{-3} = 1,06 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}, \quad \rho = \frac{1}{en\mu} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Всероссийская олимпиада школьников
Физика. 2024–2025 уч. г. Муниципальный этап. 11 класс

№	Задача 1.11.4. Критерии оценивания (14 баллов)	Баллы
1	Полный вывод выражения для напряжения Холла: $U_x = Bvb = BI/(den)$. При неполном выводе	2
а)	Выражена скорость дрейфа через силу тока: $v = I/(bden)$ (1 балл)	
б)	Выражение для напряжения Холла: $U_x = Bvb = BI/(den)$ (1 балл)	
2	Выражение для сопротивления $r + R = \mathcal{E}/I$ (0,5 балла) и $r + R = \mathcal{E}B/(U_x den)$ (0,5 балла)	1
3	Выражение сопротивления и удельного сопротивления через подвижность и концентрацию	3
а)	Записано соотношение $v = \mu E = \mu U/L$ (1 балл)	
б)	Записано соотношение $I = envbd = en\mu Ebd = en\mu Ubd/L$ (1 балл)	
в)	Получение выражения для $R = L/en\mu bd$ (0,5 балла)	
г)	Получение выражение для удельного сопротивления $\rho = 1/en\mu$ (0,5 балла)	
4	Сделан вывод о линейной зависимости r и $1/U_x$ из постоянства R как основы метода нахождения характеристик полупроводника	0,5
5	Получение соотношения (или любой аналог) $\mathcal{E}B/U_x = denr + L/(\mu b)$	0,5
6	Преобразование таблицы 1 в таблицу 2 с величиной, пропорциональной $1/U_x$, как функции r .	1
7	Указано, что по коэффициенту при переменной и свободному члену в линейной зависимости можно найти n и μ (алгебраически или по графику)	1
8	Установление параметров линейной зависимости (свободного члена $L/\mu b$)	1
9	Установление параметров линейной зависимости (коэффициента den)	1
10	Подвижность μ попала в интервале $(0,47 \div 0,51) \text{ м}^2/\text{с}\cdot\text{В}$; в интервале $(0,45 \div 0,53) \text{ м}^2/\text{с}$ (0,5 балла)	1
11	Концентрация n в интервале $(0,8 \div 1,2) \cdot 10^{22} \text{ 1/м}^3$ в интервале $(0,6 \div 1,4) \cdot 10^{22} \text{ 1/м}^3$ (0,5 балла)	1
12	ρ в интервале $(1,1 \div 1,4) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в интервале $(0,9 \div 1,6) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (0,5 балла)	1