

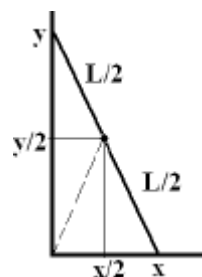
### Задание 1

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  $\alpha$ , 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  $\alpha$  (тангенс этого угла можно найти из условия неизменности длины стержня – это альтернативный способ получения ответа для угла  $\alpha$ ).

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

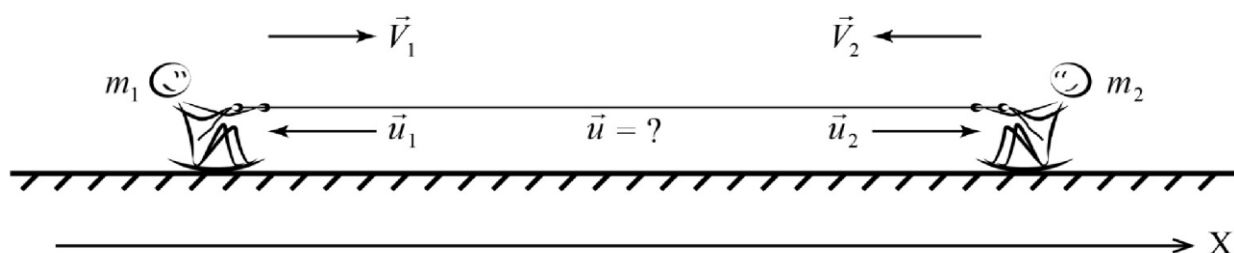
Два школьника сидят в санках-ледянках, которые покоятся на гладкой горизонтальной поверхности замёрзшего озера, и держат в руках концы длинной невесомой нерастяжимой верёвки. Они начинают «выбирать» верёвку руками и таким образом едут навстречу друг другу. В некоторый момент сила натяжения выпрямленной (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:

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

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

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:

$$V_1 = \frac{m_2(u_1 + u_2)}{m_1 + m_2} \approx 0,9 \text{ м/с}; \quad V_2 = \frac{m_1(u_1 + u_2)}{m_1 + m_2} \approx 0,7 \text{ м/с}; \quad u = |V_1 - u_1| \approx 0,1 \text{ м/с}.$$

### 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?

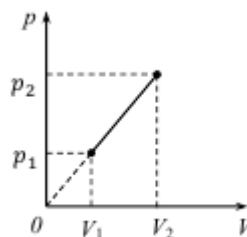
**Максимум за задачу 10 баллов.**

#### 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

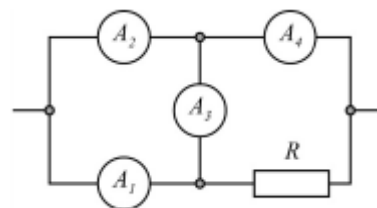
$$\Delta T = \frac{Q}{2 \nu R} = 6 \text{ К}$$

#### 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                                              |

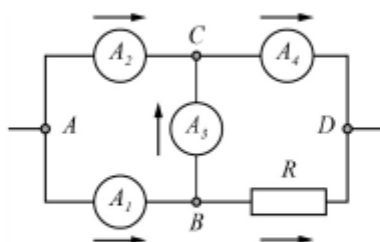
### Задание 4

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 $Q = \Delta U + A$                              |
| 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 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).

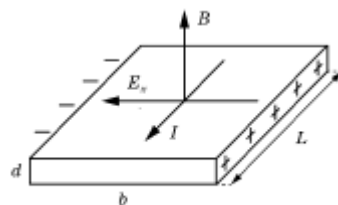


Рис. 1

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  $\mu$  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 уравновешивает электрическая сила  $eE_x$ :

$$evB = eE_x.$$

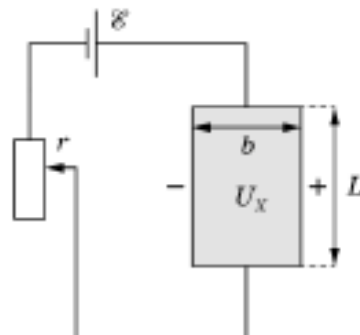
В установившемся режиме напряжённость поперечного электрического поля  $E_x = vB$ .

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  $\rho$  образца через его размеры, подвижность  $\mu$  и концентрацию  $n$  электронов проводимости.
- Используя уравнения, полученные в п.п. 1, 2, выразите  $U_x$  через концентрацию  $n$  и подвижность  $\mu$  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  $\mu$ ;
  - удельное сопротивление  $\rho$ .

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  $\mu$  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  $\mu$ .



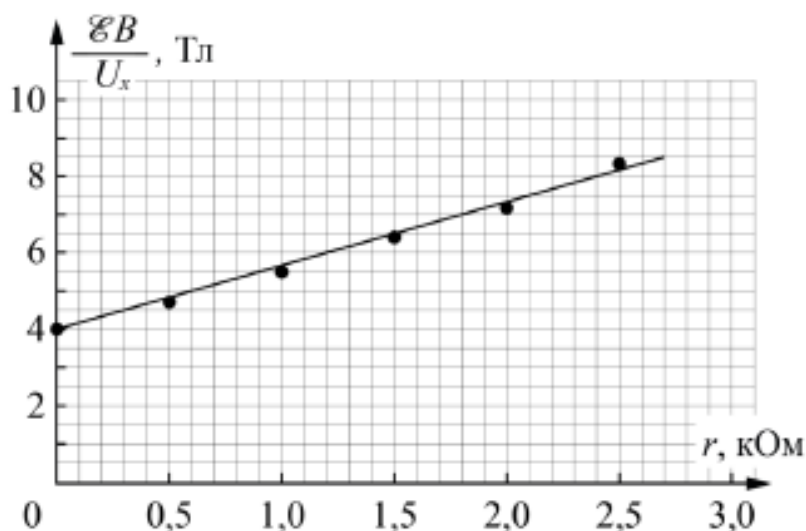
Всероссийская олимпиада школьников  
Физика. 2024–2025 уч. г. Муниципальный этап. 11 класс

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  $\text{end} = \frac{8,2 - 4,0}{2,5 \cdot 10^3} \left( \frac{\text{Тл}}{\text{Ом}} \right) \approx 1,7 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\text{Тл}}{\text{Ом}} \right)$ , 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: $U_x = Bvb = BI/(den)$ .<br>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)<br>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 $\mu$ (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 $\mu$ попала в интервале $(0,47 \div 0,51) \text{ м}^2/\text{с} \cdot \text{В}$ ;<br>в интервале $(0,45 \div 0,53) \text{ м}^2/\text{с}$ (0,5 балла) | 1     |
| 11 | Концентрация $n$ в интервале $(0,8 \div 1,2) \cdot 10^{22} \text{ 1/м}^3$<br>в интервале $(0,6 \div 1,4) \cdot 10^{22} \text{ 1/м}^3$ (0,5 балла)                | 1     |
| 12 | $\rho$ в интервале $(1,1 \div 1,4) \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$<br>в интервале $(0,9 \div 1,6) \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (0,5 балла)  | 1     |