

Обдаровані діти

УДК 37.091.27:53

Г. П. Кобель,
доцент кафедри загальної фізики та методики викладання фізики СНУ імені Лесі Українки;
В. О. Савош,
завідувач відділу фізико-математичних дисциплін ВШПО

Експериментальний тур третього етапу ЛІІ Всеукраїнської олімпіади з фізики



Наведено умови задач та їх авторські розв'язки для 8–11 класів експериментального туру третього етапу ЛІІ Всеукраїнської олімпіади з фізики.

Ключові слова: маса, лінійка, міліамперметр, вольтметр, коефіцієнт тертя ковзання.

Kobel H. P., Savosh V. O. Experimental Round of the Third Stage of LIInd All-Ukrainian Olympiad in Physics.

The tasks and their authorial decisions for 8–11 classes of experimental round of the third stage of LIInd All-Ukrainian Olympiad in Physics are given.

Key words: mass, ruler, milliamperemeter, voltmeter, coefficient of sliding friction.

17 січня 2015 року проводився експериментальний тур третього (обласного) етапу ЛІІ Всеукраїнської олімпіади юних фізиків. На нього було запрошено 12 учнів 8 класу, 15 – 9-го, 13 – 10-го і 11 учнів 11 класу.

Учасникам було запропоновано дві експериментальні задачі. При виконанні обох завдань перед учнями ставилися такі проблеми:

- розробити теорію експерименту, вивести розрахункову формулу;
- скласти план вимірювань; провести вимірювання;
- виконати обчислення шуканої величини; при потребі побудувати графічні залежності; обчислити похибки;
- вказати шляхи підвищення точності експерименту.

8 клас

Завдання 1. Визначити масу еластичної трубки із силіконової гуми. Густина матеріалу трубки $\rho = 1,2 \frac{\text{Г}}{\text{см}^3}$.

Обладнання: еластична прозора трубка, медичний шприц, лінійка, посудина з водою, циліндричне тіло.

Розв'язування. Для знаходження маси трубки потрібно визначити її об'єм: $V = S_n L$, де S_n – площа поперечного перерізу трубки, L – її довжина.

$S_n = S_3 - S_{\text{вн}}$. Площа зовнішнього перерізу $S_3 = \frac{\pi D^2}{4}$, де D – зовнішній діаметр трубки. Для його визначення намотаємо щільно на циліндричне тіло усю трубку, вимірюємо лінійкою довжину намотки l та порахуємо число витків n . Бажано, щоб l становила ціле число міліметрів, тоді похибка відліку дорівнює нулю. При намотуванні намагаємося не збільшувати поперечний діаметр трубки. Тоді шуканий діаметр $D = \frac{l}{n}$, а $S_3 = \frac{\pi l^2}{4n^2}$. Для визначення площі внутрішнього перерізу трубки наберемо у шприц певний об'єм води $V_{\text{в}}$, акуратно вставимо вихідний отвір шприца у трубку (на одному з її кінців спеціально зроблено розширення) і витіснимо воду у трубку. Вимірюємо лінійкою довжину водяного циліндра $l_{\text{в}}$. Тоді $S_{\text{вн}} = \frac{V_{\text{в}}}{l_{\text{в}}}$. Шуканий об'єм

$$\text{трубки } V = \left(\frac{\pi l^2}{4n^2} - \frac{V_{\text{в}}}{l_{\text{в}}} \right) L. \text{ Маса трубки } m = \rho V = \rho \left(\frac{\pi l^2}{4n^2} - \frac{V_{\text{в}}}{l_{\text{в}}} \right) L.$$

Наведемо дані варіанта вимірювання: $L = 103 \text{ см}$, $l = 38 \text{ мм}$, $n = 9$, $V_{\text{в}} = 4 \text{ см}^3$, $l_{\text{в}} = 58 \text{ см}$. Знайдемо масу

$$\text{у грамах: } m = 1,2 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 3,8^2}{4 \cdot 9^2} - \frac{4}{58} \right) \cdot 103 \approx 8,8 \text{ (г)}. \text{ При } V_{\text{в}} = 1 \text{ см}^3, l_{\text{в}} = 14,7 \text{ см. } m = 1,2 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 3,8^2}{4 \cdot 9^2} - \frac{1}{14,7} \right) \cdot 103 \approx 8,9 \text{ (г)}.$$

Критерії оцінювання

1. Визначено максимально точно зовнішній діаметр (методом рядів) – 2 бали.
2. Визначено площу внутрішнього перерізу – 1,5 бала.
3. Знайдено площу поперечного перерізу трубки – 0,5 бала.
4. Визначено об'єм матеріалу трубки – 0,5 бала.
5. Правильно визначено масу трубки (9–10 г) – 0,5 бала.

Завдання 2. Визначити швидкість витікання води із водопровідного крана.

Обладнання: посудина циліндричної форми, штангенциркуль, секундомір.

Розв'язування. З допомогою секундоміра вимірюємо час t наповнення склянки водою. Далі, використовуючи штангенциркуль, вимірюємо висоту води h та внутрішній діаметр склянки D . Тоді об'єм

води $V = Sh$, де $S = \frac{\pi D^2}{4}$ – площа дна склянки. $V = \frac{\pi D^2}{4} h$ (1). Виміряємо штангенциркулем внутрішній

діаметр вихідного отвору крана d . Площа перерізу крана $s = \frac{\pi d^2}{4}$. Об'єм води, яка витікає за час t :

$V = sl = \frac{\pi d^2}{4} l$. Об'єм води, яка витікає за одиницю часу: $V_t = \frac{V}{t} = \frac{sl}{t} = \frac{\pi d^2 l}{4t} = \frac{\pi d^2}{4} v$. Враховуючи (1),

маємо: $\frac{\pi D^2 h}{4t} = \frac{\pi d^2}{4} v$. Звідси $v = \frac{D^2 h}{d^2 t}$.

9 клас

Завдання 1. Визначити об'єм води у непрозорому пакеті.

Обладнання: непрозорий пакет, наповнений водою до деякого рівня, еластична прозора трубка, медичний шприц, лінійка, посудина з водою, шматок стінки пакета.

Загальне обладнання: штангенциркуль.

Змінювати рівень води у пакеті заборонено!

Розв'язування. Через отвір для трубки на верхній основі пакета опустимо у воду один кінець еластичної прозорої трубки. У другий її кінець (трохи розширений) вставимо шприц і акуратно витягуємо поршень шприца. Коли рівень води у трубці опуститься нижче рівня води у пакеті, піднімаємо шприц угору, роблячи петлю з трубки. Від'єднуємо шприц, еластичну трубку притуляємо до пакета і на його бічній грані та на трубці відмічаємо висоту рівня води. Лінійкою вимірюємо висоту h рівня води у непрозорому пакеті. Вимірюємо горизонтальні розміри a та b пакета. Тоді знаходимо об'єм води у пакеті: $V = abh$.

$$V = 4,8 \cdot 3,8 \cdot 8,3 = 151,4 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Формула для відносної похибки: $\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta h}{h}$.

Проте такий результат не є точним. Для точнішого визначення об'єму води потрібно відняти об'єм дна та стінок пакета. Для цього штангенциркулем вимірюємо товщину матеріалу стінки пакета d . Наданий матеріал краще зігнути у кілька разів або взяти кілька шматочків і штангенциркулем виміряти загальну товщину D .

Тоді $d = \frac{D}{n}$. Тоді об'єм самої води $V_B = (a - 2d)(b - 2d)(h - d)$.

Крім того, потрібно врахувати об'єм води в еластичній трубці при визначенні висоти рівня води у посудині. Набираємо у шприц води об'ємом V_1 , вставляємо кінець шприца у трубку з тієї сторони, яку ми опускали у воду. Рухаючи повільно поршень, витискуємо воду в трубку до мітки на ній. За зміною показів шприца знаходимо додатковий об'єм $(V_1 - V_2)$ води, який додамо до визначеного об'єму води. Отже, $V_B = (a - 2d)(b - 2d)(h - d) + (V_1 - V_2)$.

Наведемо варіант вимірювання для одного з пакетів. У пакет було налито 150 мл води з допомогою шприца.

$a = 48 \text{ мм}$, $b = 38 \text{ мм}$, $h = 83 \text{ мм}$, $d = \frac{1 \text{ мм}}{4} = 0,25 \text{ мм}$, $V_1 - V_2 = 2,2 \text{ см}^3$. Тоді об'єм води у пакеті

$$V_B = (4,8 - 2 \cdot 0,025) \cdot (3,8 - 2 \cdot 0,025) \cdot (8,3 - 0,025) + 2,2 = 149,6 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Критерії оцінювання

1. Висунуто ідею порівняти рівень води у пакеті з рівнем у прозорій трубці – 1 бал.
2. Виміряно висоту рівня води, розміри пакета і пораховано об'єм води – 2 бали.
3. Вищевказані виміри зроблено чітко і пораховано похибку – 1 бал.
4. Сказано, що частина води у трубці зменшує виміряну висоту, – 0,5 бала.
5. Виміряно об'єм води у трубці – 1 бал.
6. Виміряно товщину стінок пакета і враховано зменшення об'єму води – 0,5 бала.

Завдання 2. На рис. 1 зображено покази послідовно з'єднаних у колі вольтметра та міліамперметра (рис. 2). Який додатковий опір потрібно використати, щоб розширити межі вимірювання даного вольтметра у 10 разів?

Обладнання: джерело постійного струму; міліамперметр; вольтметр; з'єднувальні провідники; ключ, змінний опір.

Розв'язування. Для визначення внутрішнього опору вольтметра складемо електричне коло.

За показами амперметра й вольтметра знайдемо внутрішній опір вольтметра. $R_V = \frac{U}{I}$. Значення

додаткового опору $R_d = (n - 1)R_V = \left(\frac{U_2}{U_1} - 1\right) \frac{U}{I}$.

За показами приладів: $R_d = \left(\frac{60}{6} - 1\right) \cdot \frac{4,6}{7 \cdot 10^{-3}} = 5914 \text{ (Ом)} = 5,9 \text{ кОм}$.

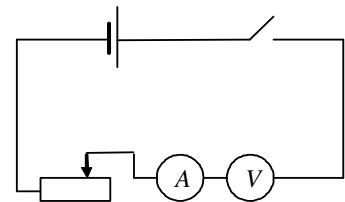
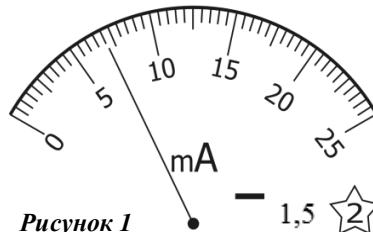
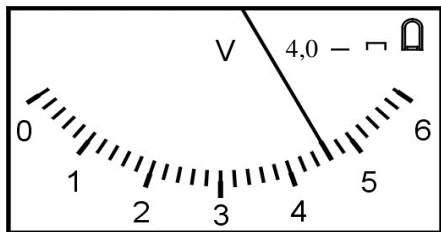


Рисунок 1

Рисунок 2

Відносну похибку результату знаходимо за формулою: $\varepsilon = \frac{\Delta R_d}{R_d} = \varepsilon_V \frac{U_n}{U_b} + \varepsilon_I \frac{I_n}{I_b}$.

$\varepsilon_V = 4\% = 0,04$ – клас точності вольтметра, $\varepsilon_I = 1,5\% = 0,015$ – клас точності амперметра, які вказано

на приладах. $\varepsilon = \frac{\Delta R_d}{R_d} = 0,04 \cdot \frac{6}{4,6} + 0,015 \cdot \frac{25}{7} = 0,052 + 0,0536 = 0,1056 \approx 0,11$, $\Delta R_d = \varepsilon R_d = 0,11 \cdot 5914 = 625 \text{ (Ом)}$.

$R_d = (5,9 \pm 0,6) \text{ кОм}$.

10 клас

Завдання 1. Визначити коефіцієнт тертя ковзання ручки на поверхні горизонтального стола.

Обладнання: кулькова ручка із кнопково-пружинним механізмом, лінійка, прямокутний шматок паперу, скріпка, штатив.

Нахилити стіл заборонено!

Розв'язування. Фіксованої швидкості можна надати ручці з допомогою кнопково-пружинного механізму. Він спрацьовує так, що один раз кнопка вискакує різко, а другий – ні. Всі вимірювання потрібно виконувати при різкому вискакуванні кнопки. Притискуємо до торця стола лінійку так, щоб вона трохи виступала над столом (2 см). Утопивши кнопку до межі, запускаємо ручку по столу при різкому виході кнопки. Враховуємо лише випадки поступального руху ручки. Для цього експеримент виконуємо не менше 10 разів. Вимірюємо шлях S , який проходить ручка до зупинки (від краю столу до початку кнопки ручки). Уся кінетична енергія ручки витрачається на виконання роботи з подолання сили тертя $E_k = F_{mp} s$. Ручка рухається поступально на горизонтальній поверхні, тому сила тертя $F_{mp} = \mu mg$, де μ – шуканий коефіцієнт тертя, m – маса ручки.

Для визначення кінетичної енергії, яку отримує ручка за рахунок потенціальної енергії стиснутої пружини, дослідимо підскакування ручки вертикально угору. Ставимо вертикально лінійку. Поряд із лінійкою притискуємо ручку кнопкою до поверхні столу, тримаючи її вертикально. Відпускаємо ручку без тертя об пальці й визначаємо висоту підскакування ручки h . Висоту підняття ручки легше фіксувати з допомогою прямокутного шматка паперу, який кріпимо до лінійки з допомогою скріпки. До таблиці заносимо лише ті результати, які отримано при різкому підскакуванні ручки при її вертикальному сповільненому русі.

Методичні публікації

Для руху ручки виконується закон збереження енергії $E_k = mgh$. Отже, $mgh = \mu mgs$. Звідси знаходимо:

$$\mu = \frac{h}{s}$$

В обох вимірюваннях на результат суттєво впливає випадкова похибка, яку можна зменшити лише виконанням значної кількості дослідів.

За результатами дослідів знаходимо середні значення шляху та висоти.

Дані вимірювань заносимо у таблицю:

№ з/п	s , мм	$(s_i - \bar{s})^2$	h , мм	$(h_i - \bar{h})^2$
1	315	1	82	4
2	310	36	84	16
3	312	16	78	4
4	320	16	77	9
5	315	1	81	1
6	322	36	83	9
7	317	1	76	16
8	314	4	80	0
ср.	$\bar{s} = 316$	$\sum_{i=1}^8 (s_i - \bar{s})^2 = 111$	$\bar{h} = 80$	$\sum_{i=1}^8 (h_i - \bar{h})^2 = 59$

Знаходимо коефіцієнт тертя ковзання за середніми значеннями s та h : $\mu = \frac{80}{316} = 0,253$.

Обчислимо випадкову похибку прямих вимірювань шляху і висоти. Знайдемо для надійної ймовірності $\alpha = 0,9$.

$$\Delta s_b = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (s_i - \bar{s})^2}{n(n-1)}}. \text{ Коефіцієнт Стьюдента } t_{\alpha, n} = t_{0,9,8} = 1,86, \text{ тоді } \Delta s_b = 1,86 \sqrt{\frac{111}{8 \cdot 7}} = 2,6 \text{ (мм)}.$$

Абсолютні похибки прямих вимірювань включають інструментальну похибку, похибку відліку та випадкову похибку: $\Delta h = \Delta h_{\text{ін}} + \Delta h_{\text{від}} + \Delta h_b$, $\Delta s = \Delta s_{\text{ін}} + \Delta s_{\text{від}} + \Delta s_b$.

Похибки відліку та інструментальна дорівнюють 0,5 мм. Тоді сумарна абсолютна похибка для вимірювання шляху ковзання ручки $\Delta s = 3,6$ мм.

Аналогічно для висоти: $\Delta h_b = 1,86 \sqrt{\frac{59}{8 \cdot 7}} = 1,9$ (мм). Сумарна абсолютна похибка для вимірювання висоти

$\Delta h = 2,9$ мм.

$$\text{Відносна похибка результату } \varepsilon = \frac{\Delta \mu}{\mu} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta s}{s}\right)^2} \cdot \varepsilon = \sqrt{\left(\frac{2,9}{80}\right)^2 + \left(\frac{3,6}{316}\right)^2} = 0,04$$

Тоді $\Delta \mu = \varepsilon \mu$, $\Delta \mu = 0,04 \cdot 0,253 = 0,01$. $\mu = 0,25 \pm 0,01$.

Критерії оцінювання

1. Використано кнопково-пружинний механізм ручки для надання їй швидкості – 1 бал.
2. Виміряно висоту підскакування ручки – 1 бал.
3. Виміряно шлях руху ручки – 1 бал.
4. Виконано достатнє число вимірювань шляху ковзання та висоти підскакування ручки – 0,5 бала.
5. Визначено коефіцієнт тертя ковзання ручки – 1 бал.
6. При обчисленні похибок враховано випадкові похибки – 0,5 бала.

Завдання 2. На рис. 1 зображено покази послідовно з'єднаних у колі вольтметра та міліамперметра (рис. 2). Межі вимірювання даного вольтметра треба розширити у 10 разів. Визначити межі для значення додаткового опору, який потрібно використати для цього.

Обладнання: джерело постійного струму, міліамперметр, вольтметр, з'єднувальні провідники, ключ, змінний опір.

Розв'язування. Для визначення внутрішнього опору вольтметра складемо електричне коло.

За показами амперметра й вольтметра знайдемо внутрішній опір вольтметра. $R_V = \frac{U}{I}$. Значення

$$\text{додаткового опору } R_d = (n - 1)R_V = \left(\frac{U_2}{U_1} - 1\right) \frac{U}{I}.$$

$$\text{За показами приладів: } R_d = \left(\frac{60}{6} - 1\right) \cdot \frac{4,6}{7 \cdot 10^{-3}} = 5914 \text{ (Ом)} = 5,9 \text{ кОм}.$$

Відносну похибку результату знаходимо за формулою: $\varepsilon = \frac{\Delta R_d}{R_d} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I_s}\right)^2}$. Абсолютні похибки

для напруги та сили струму знаходимо за формулами: $\Delta U = \varepsilon_V U_n$, $\Delta I = \varepsilon_I I_n$.

$\varepsilon_V = 4\% = 0,04$ – клас точності вольтметра, $\varepsilon_I = 1,5\% = 0,015$ – клас точності амперметра, які вказано на приладах.

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_d}{R_d} = \sqrt{\left(\frac{0,04 \cdot 6}{4,6}\right)^2 + \left(\frac{0,015 \cdot 25}{7}\right)^2} \approx 0,075. \text{ Абсолютна похибка } \Delta R_d = \varepsilon R_d = 0,075 \cdot 5914 = 442 \text{ (Ом)}.$$

$$R_d = (5,9 \pm 0,4) \text{ кОм}.$$

Межі для додаткового опору: $(5,9 - 0,4) \text{ кОм} \leq R_d \leq (5,9 + 0,4) \text{ кОм}$, $5,5 \text{ кОм} \leq R_d \leq 6,1 \text{ кОм}$.

II клас

Завдання 1. Визначити, яку мінімальну швидкість потрібно надати ручці, щоб вона проковзала поступально на поверхні горизонтального стола відстань $L = 50$ см.

Обладнання: кулькова ручка із кнопково-пружинним механізмом, лінійка, прямокутний шматок паперу, скріпка, штатив.

Нахилити стіл заборонено!

Розв'язування. Початкова швидкість тіла при рівносповільненому русі до зупинки $v_0 = \sqrt{2aL}$. Для визначення прискорення a застосуємо закони динаміки до сповільненого руху ручки. $F_{mp} = ma$, $\mu mg = ma$. Звідси $a = \mu g$. Тоді шукана швидкість $v_0 = \sqrt{2\mu gL}$. Для розв'язування поставленої задачі потрібно визначити коефіцієнт тертя ковзання ручки μ на поверхні стола.

Фіксованої швидкості можна надати ручці з допомогою кнопков-пружинного механізму. Він спрацьовує так, що один раз кнопка вискакує різко, а другий – ні. Всі вимірювання потрібно виконувати при різкому вискакуванні кнопки. Притискуємо до торця стола лінійку так, щоб вона трохи виступала над столом (2 см). Утопивши кнопку до упору, запускаємо ручку по столу при різкому виході кнопки. Враховуємо лише випадки поступального руху ручки. Для цього експеримент виконуємо не менше 10 разів. Вимірюємо шлях s , який проходить ручка до зупинки (від краю столу до початку кнопки ручки). Уся кінетична енергія ручки витрачається на виконання роботи з подолання сили тертя: $E_k = F_{mp}s$. Ручка рухається поступально на горизонтальній поверхні, тому сила тертя $F_{mp} = \mu mg$, де μ – шуканий коефіцієнт тертя, m – маса ручки.

Для визначення кінетичної енергії, яку отримує ручка за рахунок потенціальної енергії стиснутої пружини, дослідимо підскакування ручки вертикально угору. Ставимо вертикально лінійку. Поряд із лінійкою притискуємо ручку кнопкою до поверхні столу, тримаючи її вертикально. Відпускаємо ручку без тертя об пальці й визначаємо висоту підскакування ручки h . Висоту піднімання ручки легше фіксувати з допомогою прямокутного шматка паперу, який кріпимо до лінійки з допомогою скріпки. До таблиці заносимо лише ті результати, які отримано при різкому підскакуванні ручки при її вертикальному сповільненому русі.

Для руху ручки виконується закон збереження енергії $E_k = mgh$. Отже, $mgh = \mu mgs$. Звідси знаходимо: $\mu = \frac{h}{s}$. В обох вимірюваннях на результат суттєво впливає випадкова похибка, яку можна зменшити лише виконанням значної кількості дослідів. За результатами дослідів знаходимо середні значення шляху та висоти.

$$\text{Тоді початкова швидкість тіла для шляху } L: v_0 = \sqrt{2\mu gL} = \sqrt{\frac{2ghL}{s}}.$$

Відносна похибка результату $\varepsilon = \frac{\Delta v_0}{v_0} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta s}{s}\right)^2}$. Результати вимірювань та абсолютні

похибки прямих вимірювань шляху і висоти наведено у розв'язуванні завдання 2 (10 клас). Виконаємо обчислення шуканої швидкості, відносної та абсолютної похибок.

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,8 \cdot 0,08 \cdot 0,5}{0,316}} = 1,575 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{\Delta v_0}{v_0} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2,9}{80}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3,6}{316}\right)^2} = 0,02 \cdot$$

$$\Delta v_0 = 0,02 \cdot 1,575 = 0,03 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right). v_0 = (1,58 \pm 0,03) \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Критерії оцінювання

1. Використано кнопково-пружинний механізм ручки для надання їй швидкості – 1 бал.
2. Виміряно висоту підскакування ручки – 1 бал.
3. Виміряно шлях руху ручки – 1 бал.
4. Виконано достатнє число вимірювань шляху ковзання та висоти підскакування ручки – 0,5 бала.
5. Визначено коефіцієнт тертя ковзання ручки – 1 бал.
6. Визначено початкову швидкість та обчислено похибки із врахуванням випадкової похибки – 0,5 бала.

Завдання 2. На рис. 1 зображено покази послідовно з'єднаних у колі вольтметра та міліамперметра (рис. 2). Межі вимірювання даного вольтметра потрібно розширити у 10 разів. Визначити максимальну довжину ніхромової дротини діаметром $d = 0,2$ мм, яка необхідна для виготовлення додаткового опору. $\rho_n = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Обладнання: джерело постійного струму; міліамперметр; вольтметр; з'єднувальні провідники; ключ, змінний опір.

Розв'язування. Для визначення внутрішнього опору вольтметра складемо електричне коло.

За показами амперметра й вольтметра знайдемо внутрішній опір вольтметра. $R_V = \frac{U}{I}$. Значення

$$\text{додаткового опору } R_d = (n - 1)R_V = \left(\frac{U_2}{U_1} - 1\right) \frac{U}{I}.$$

$$\text{За показами приладів: } R_d = \left(\frac{60}{6} - 1\right) \cdot \frac{4,6}{7 \cdot 10^{-3}} = 5914 \text{ (Ом)} = 5,9 \text{ кОм}.$$

Відносну похибку результату знаходимо за формулою: $\varepsilon = \frac{\Delta R_d}{R_d} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U_s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I_s}\right)^2}$. Абсолютні

похибки для напруги та сили струму знаходимо за формулами: $\Delta U = \varepsilon_V U_n$, $\Delta I = \varepsilon_I I_n$.

$\varepsilon_V = 4\% = 0,04$ – клас точності вольтметра, $\varepsilon_I = 1,5\% = 0,015$ – клас точності амперметра, які вказано на приладах.

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_d}{R_d} = \sqrt{\left(\frac{0,04 \cdot 6}{4,6}\right)^2 + \left(\frac{0,015 \cdot 25}{7}\right)^2} \approx 0,075, \Delta R_d = \varepsilon R_d = 0,075 \cdot 5914 = 442 \text{ (Ом)}.$$

$$R_d = (5,9 \pm 0,4) \text{ кОм}.$$

Межі для додаткового опору: $(5,9 - 0,4) \text{ кОм} \leq R_d \leq (5,9 + 0,4) \text{ кОм}$, $5,5 \text{ кОм} \leq R_d \leq 6,1 \text{ кОм}$.

Знаходимо довжину ніхромової дротини для максимального значення додаткового опору: $R_{\text{дм}} = 6,1 \text{ кОм}$.

$$R_d = \rho_n \frac{l}{S} = \frac{4\rho_n l}{\pi d^2}. \text{ Звідси знаходимо довжину: } l = \frac{\pi d^2 R_{\text{дм}}}{4\rho_n}.$$

$$l = \frac{3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 6,1 \cdot 10^3}{4 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}} = 174,1 \text{ (м)}.$$

Література

1. Гончаренко С. У. Фізика. Олімпіадні задачі. Вип. 2. 9–11 класи / С. У. Гончаренко, Є. В. Коршак. – Т. : Навч. кн.–Богдан, 1999. – 200 с.
2. Задачі по фізиці : учебн. пособие / [под ред. О. Я. Савченко]. – СПб. : Лань, 2001. – 368 с.