

Методическая комиссия по физике при оргкомитете

Городской открытой олимпиады школьников Санкт-Петербурга по физике

Городская открытая олимпиада школьников по физике 2025/26 года

Заключительный этап

Экспериментальный тур

Учебно-методическое пособие

Сайт физических олимпиад школьников: <http://physolymp.spb.ru>

Шейнман И. Л., Бикулова Д. А., Клюев К. М., Розова С. Е., Ситников А. Т.
Городская открытая олимпиада школьников по физике 2025/26 года.
Заключительный этап. Экспериментальный тур. Учеб.-метод. пособие. СПб.:
<http://physolymp.spb.ru>, 2026. 28 с.

Содержит условия, решения и критерии оценивания
экспериментальных задач, предложенных на экспериментальном туре
заключительного этапа Открытой олимпиады школьников Санкт-Петербурга
по физике.

Авторы задач

9 класс	10 класс	11 класс
1. Отскок крупы Шейнман И. Л.	1. Спиральная пружина Шейнман И. Л. Клюев К. М.	1. Два магнита, один магнит Шейнман И. Л. Розова С. Е.
2. Сладкая диффузия Бикулова Д. А. Розова С. Е.	2. Цилиндрический конденсатор Шейнман И. Л. Ситников А. Т.	2. Преломление в пробирке Шейнман И. Л.

РЕШЕНИЯ

Задача 9.1. Отскок крупы

Исследуйте явление отскока крупы от стола в зависимости от высоты отпускания. Определите коэффициент трения между крупинками и столом. Оцените коэффициент восстановления нормальной компоненты скорости крупинки при отскоке $\left(k = \frac{v_n \text{ после отскока}}{v_n \text{ перед отскоком}} \right)$.

Оборудование: линейка, крупа, бумага.

Решение

Для фиксации начальной высоты сделаем из бумаги кулек.

1. Перед касанием стола:

$$v_0 = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

2. После соударения без отскока:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p_{\perp}}{\Delta t} &= N, \quad \frac{\Delta p_{\parallel}}{\Delta t} = F_{\text{тр}} \leq \mu N = \mu \frac{\Delta p_{\perp}}{\Delta t}. \\ \Delta v_{\parallel} &\leq \mu \Delta v_{\perp} \\ v_{\parallel} &\leq \mu v_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Если рассматривать скольжение:

$$\begin{aligned} \frac{mv_{\parallel}^2}{2} &= \mu mgl \quad \frac{\mu^2 v_0^2}{2} = \mu gl \quad \mu = \frac{2gl}{v_0^2} \\ \mu &= \frac{l}{h}. \end{aligned}$$

3. Учет однократного отскока:

$$v_{\perp 1} = v_1 = kv_0, \quad v_{\parallel 1} \leq \mu(v_0 + v_1) = \mu v_0(1 + k) \quad (3)$$

Дальность полета:

$$gt = 2v_1, \quad l_n = v_{\parallel}t = \frac{2v_1 v_{\parallel}}{g} < \frac{2}{g} \mu v_0^2 k(1 + k)$$

$$\begin{aligned}
l_{n1} &< \frac{2v_0^2}{g} \mu k (1+k) = 4h\mu k (1+k) \\
k^2 + k - \frac{l_{n1}}{4h\mu} &= 0, \\
k &= -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{l_{n1}}{h\mu}}
\end{aligned} \tag{4}$$

Второй отскок:

$$\begin{aligned}
v_2 &= kv_1 = k^2 v_0, \\
v_{||2} &= v_{||1} - \mu(v_1 + v_2) = \mu v_0 (1+k) - \mu v_1 (1+k) = \mu v_0 (1-k)(1+k) = \mu v_0 (1-k)(1+k) \\
l_{n2} &= \frac{2v_0^2 k^2 \mu (1+k)(1-k)}{g} = 4hk^2 \mu (1+k)(1-k)
\end{aligned}$$

Третий отскок

$$\begin{aligned}
v_3 &= k^3 v_0, \\
v_{||3} &= v_{||2} - \mu(v_2 + v_3) = \mu v_0 (1-k)(1+k) - \mu v_2 (1+k) = \mu v_0 (1-k)(1+k) - \mu k^2 v_0 (1+k) \\
v_{||3} &= \mu v_0 (1+k)(1-k-k^2) \\
l_{n2} &= \frac{2v_0^2 \mu k^3 (1+k)(1-k-k^2)}{g} \\
&\dots
\end{aligned}$$

Многократный отскок:

$$\begin{aligned}
l &= \sum_{i=1}^{\infty} l_{ni} = \frac{2v_0^2}{g} \mu k (1+k) + \frac{2v_0^2 k^2 \mu (1+k)(1-k)}{g} + \frac{2v_0^2 \mu k^3 (1+k)(1-k-k^2)}{g} + \dots = \\
&= \frac{2v_0^2}{g} \mu k (1+k) (1+k(1-k) + k^2(1-k-k^2) + k^3(1-k-k^2-k^3) + \dots) = \\
&= \frac{2v_0^2}{g} \mu k (1+k) (1+k-k^4-k^5-k^6+\dots)
\end{aligned}$$

Пренебрегая степенями k от 4 и выше, получим:

$$l \approx \frac{2v_0^2}{g} \mu k (1+k)^2 = 4h\mu k (1+k)^2.$$

$$l \approx 4h\mu k (1+2k)$$

$$2k^2 + k - \frac{l}{4h\mu} = 0$$

$$k = -\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \sqrt{1 + \frac{2l}{h\mu}} \quad (5)$$

h , см	5	10	15	20	25	30
$\langle l \rangle$, см	4.5	10.0	13.4	21	29.5	32.4

Использование формулы $\mu = \frac{l}{h}$ дает коэффициент трения, близкий к 1, что абсолютно не согласуется с определением его по наклону стола ($\mu = 0.3$). Следовательно, необходимо учитывать отскоки.

Критерии оценивания 9.1

1. Получена формула (1)	1
2. Получена формула (2)	2
3. Получена формула (3)	1
4. Получена формула (4)	2
5. Получена формула (5)	4
6. Проведены измерения максимальной дальности разлета от высоты	1
7. Определено значение μ по соскальзыванию со стола при его наклоне	1
8. Определено $k \approx 0,4 \dots 0.5$ на основе формулы (5). Если по (4), то 1 балл	2
9. Проведено усреднение. Получено значение	1

Если участник измеряет на глаз высоту отскока, чтобы из нее найти k , за эту попытку вместо пунктов 2-5 ставится 1 балл.

Комментарий

Сопоставление результата ($k \approx 0,44$) с прямыми замерами на основе видеофиксации ($k \approx 0,3$) показывают некоторое завышение k на основе оценки разлета, что связано с неучетом качения.

Задача 9.2. Сладкая диффузия

Диффузия (лат. diffusio «распространение, растекание, рассеивание; взаимодействие») – самопроизвольное перемешивание соприкасающихся веществ, происходящее вследствие хаотического (беспорядочного) движения молекул. Скорость диффузии зависит от температуры.

Известно, что радиус растекания красителя в жидкости зависит от времени по закону $r = \sqrt{3Dt}$, где D – коэффициент диффузии. Согласно

закону Аррениуса: $D = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}$, где E_a – энергия активации для диффузии [Дж/моль]. На основе эксперимента определите энергию активации и предэкспоненциальный множитель D_0 в этой зависимости.

Оборудование: 10 конфет, чашка Петри, сосуд для воды, термометр, секундомер, салфетки. Горячую воду вы можете получить у дежурного по кабинету, лишнюю – слить в предоставленное общее ведро).

Решение

$$r = \sqrt{3Dt}, \quad t = \frac{r^2}{3D}.$$

Закон Аррениуса: $D = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}$, где E_a – энергия активации для диффузии [Дж/моль].

$$t = \frac{r^2}{3D} = \frac{r^2}{3D_0} e^{\frac{E_a}{RT}}$$

$$\ln t = \ln \left(\frac{r^2}{3D_0} \right) + \frac{E_a}{R} \frac{1}{T}$$

Ход эксперимента и методика

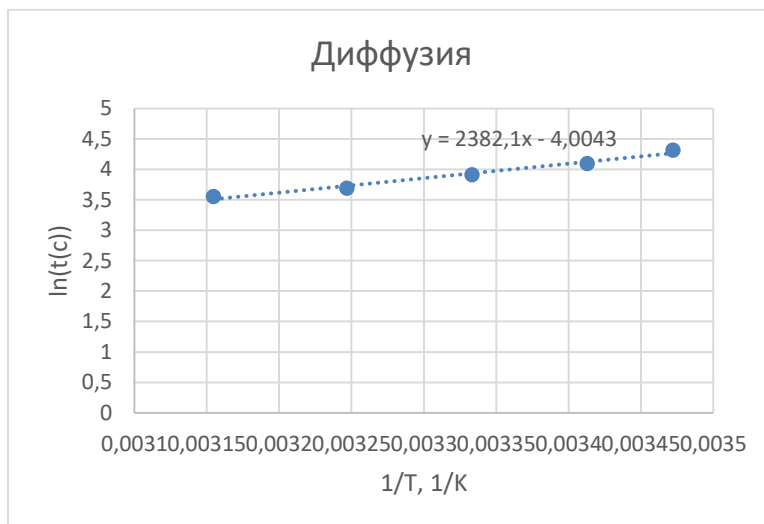
Нальём в чашку Петри воду, измерим её температуру. Поместим конфету в чашку и будем замерять время, за которое пятно краски растечётся до радиуса $r = 1$ см. После этого сольём воду и повторим эксперимент с новой конфетой и водой. Повторим эту процедуру 10 раз.

Важно, что конфета должна располагаться вблизи центра чашки, иначе диффузионное пятно дойдет до границы и изменит свою форму. Также важно именно класть конфету в воду, а не лить воду на конфету, так как в противном случае возникнут потоки жидкости, сильно влияющие на растекание красителя.

Полученные данные

Время t (с)	Температура воды T_c (в °C)
75	15
60	20
50	27
40	35
35	44

График зависимости:



Коэффициент наклона $k = 2382,1 = \frac{E_a}{R}$, следовательно $E_a = 19,7$ кДж/моль

Коэффициент сдвига $b = -4 = \ln\left(\frac{r^2}{3D_0}\right)$. Следовательно $D_0 = 18,2$ см²/с .

Критерии оценивания 9.2

1.	Получено выражение (1)	2 балла
2.	Конфета положена в воду, а не вода наливается на конфету	1 балл
3.	Конфета располагалась в центре чашки Петри	1 балл
4.	Получены не менее 7 точек (до 3 – 0 б; 3-4 – 1 б; 5-6 – 2 б)	2 балла
5.	Построен график зависимости $\ln(t)$ от $1/T$ (шкала, единицы измерения, точки, обозначения осей, аппроксимирующая прямая, размеры графика) – все по 0.5 балла	3 балла
6.	Получена энергия активации E_a	3 балла
7.	Получен коэффициент D_0	3 балла