



# Республиканская физическая олимпиада 2022 года (Заключительный этап)

## Экспериментальный тур

# Решения задач 9 класс (для жюри)

Уважаемые члены жюри!

Задачи, предложенные школьникам для решения на олимпиаде, не стандартные и достаточно сложные. Предложенные здесь варианты путей решений не являются единственно возможными. Участники олимпиады могут предложить свои способы решения. Если эти способы приводят к правильным ответам и физически обоснованы, то задача (или ее отдельные пункты) должны оцениваться максимальными баллами.

Не забывайте, что Вы должны оценивать не только конечные ответы, но и отдельные правильные шаги в ходе решения!



***Не жалейте баллов (если, конечно, есть за что!) для наших замечательных школьников!***

### Задание 9-1. Ускоренное движение.

1. Измерения координат датчиков проводятся с помощью линейки. Для разных установок положения датчиков могут отличаться в пределах  $\pm 2$  см.

2. Датчики позволяют снимать времена прохождения шарика сквозь них. Причем счет времени запускается при прохождении первого датчика.

Таким образом, в результате одного эксперимента имеет три пары чисел – результатов измерений: координаты и времена прохождения:  $(x_1, t_1), (x_2, t_2), (x_3, t_3)$ . Оптимальным способом доказательства, того что движение является равноускоренным является построение линеаризованной зависимости  $\frac{x}{t}(t)$ . Эксперимент однозначно подтверждает, что эта зависимость линейная, следовательно, движение шарика – равноускоренное.

3. При выводе расчетной формулы следует учесть, что при прохождении первого датчика шарик уже имеет некоторую начальную скорость  $v_0$ . Поэтому координаты датчиков и времена их прохождения связаны соотношениями:

$$\begin{aligned}x_1 &= v_0 t_1 + \frac{a t_1^2}{2} \\x_2 &= v_0 t_2 + \frac{a t_2^2}{2} . \\x_3 &= v_0 t_3 + \frac{a t_3^2}{2}\end{aligned}\tag{1}$$

Это система трех уравнений с двумя неизвестными (ускорение и начальная скорость), для ее решения можно выбрать любые два уравнения. Для повышения точности следует взять второе и третье уравнения, из которых следует, что ускорение можно рассчитать по формуле:

$$a = 2 \frac{\frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2}}{t_3^2 - t_2^2} .\tag{2}$$

4. Угол наклона трубки можно изменять с помощью лапки штатива. В качестве меры угла можно измерить (с помощью линейки) синус этого угла:

$$\sin \alpha = \frac{h}{l} .\tag{3}$$

Где  $l$  - длина трубки.  $h$  - высота приподнятого конца трубки. Для построения исследуемой зависимости следует измерить ускорения не менее, чем при 5 значениях углов наклона.

При каждом угле наклона следует проводить несколько измерений, а потом усреднить их результаты. Для того, чтобы получить линейную зависимость, следует построить график зависимости ускорения от синуса угла наклона  $a = f(\sin \alpha)$ .

Эксперимент дает результаты очень близкие к теоретической зависимости

$$a = \frac{7}{5} g \sin \alpha .\tag{4}$$

5. Для второго шарика результаты получаются практически такими же.

6. Из эксперимента однозначно следует, что шарика разных диаметров скатываются одинаково.

7. Измерения со скользящим цилиндром проводятся аналогично. Имеются два существенных отличия от скатывания шарика: первое, времена соскальзывания существенно больше; второе, имеет некоторый минимальный угол наклона (примерно  $20^\circ$ ), при котором начинается соскальзывание.

8. Теоретическая зависимость ускорения от угла наклона изучается в курсе физики и имеет вид:

$$a = g \sin \alpha - \mu g \cos \alpha . \quad (5)$$

Для того, чтобы использовать все экспериментальные данные, необходимо линеаризовать зависимость (5), что можно сделать различными способами. Наиболее предпочтительным

является построение линейной зависимости величины  $Y = \frac{a}{\sin \alpha}$  от величины  $X = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}$ :

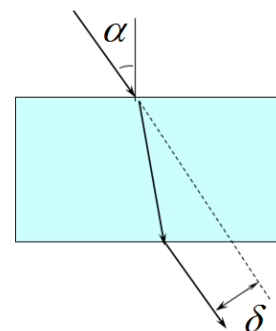
$$Y = g - \mu g X . \quad (6)$$

По коэффициентам этой зависимости легко рассчитываются требуемые величины: ускорение свободного падения и коэффициент трения.

## Задание 9-2. Закон преломления света.

### Часть 1. Прохождение луча света через две параллельные границы.

1.1 После прохождения луча света через плоскопараллельную пластинку, направление распространения луча не изменяется, происходит его сдвиг. Для доказательства этого утверждения необходимо рассмотреть преломление на двух поверхностях: так как уравнение закона преломления не зависит от направления распространения света, то после второго преломления угол между выходящим лучом и нормалью восстановит свое прежнее значение  $\alpha$ , то есть пойдет параллельно падающему лучу.



1.2 Согласно закону преломления света и на основании простых геометрических построений следует, что величина сдвига луча определяется формулой

$$\delta = h \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} . \quad (1)$$

Где  $\beta$  - угол преломления,  $h$  - толщина пластины. В приближении малых углов (когда  $\alpha = n\beta$ ) эта формула упрощается:

$$\delta \approx h \frac{(\alpha - \beta)}{1} = \frac{n-1}{n} \alpha . \quad (2)$$

И приводит к линейной зависимости сдвига луча от угла падения.

1.3 Схема оптических измерений в данном случае очевидна: луч лазера падает на призму, расположенную на транспортире, после преломления луч падает нормально на линейку, которая служит экраном. Полученная зависимость, строго говоря, не является линейной, но при углах меньших  $\alpha < 30^\circ$  можно выделить линейный участок.

1.4 Как следует из формулы (2) коэффициент наклона зависимости  $\delta(\alpha)$  равен  $K = \frac{\Delta \delta}{\Delta \alpha} = \frac{n-1}{n}$ . Этот коэффициент можно найти графически, или по методу наименьших

квадратов. После этого можно вычислить показатель преломления материала призмы, который должен лежать в диапазоне от 1,5 до 1,65.

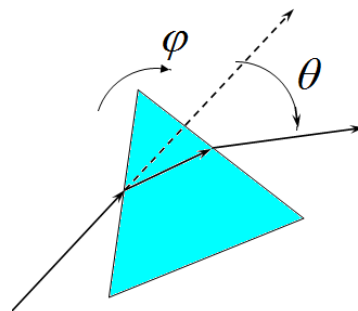
## Часть 2. Преломление света в треугольной призме.

**2.1** После прохождения луча света через треугольную призму, направление его распространения изменяется, причем эта зависимость оказывается нелинейной и немонотонной. Существует и легко находится положение призмы при угле минимального отклонения.

**2.2** При угле минимального отклонения внутри призмы луч идет параллельно ее основанию. Так как призма правильная, то в этом случае преломленный угол равен  $\beta = 30^\circ$ , поэтому закон преломления света на передней грани имеет вид

$$\sin \alpha = n \sin 30^\circ = \frac{n}{2} \quad (3)$$

Угол падения  $\alpha$  можно измерить непосредственно на установке с помощью транспортира, а затем с помощью формулы (3) рассчитывается показатель преломления материала треугольной призмы. Этот показатель также лежит в интервале от 1,5 до 1,65.





# Республиканская физическая олимпиада 2022 года (Заключительный этап)

## Экспериментальный тур

# Решения задач 10 класс (для жюри)

Уважаемые члены жюри!

Задачи, предложенные школьникам для решения на олимпиаде, не стандартные и достаточно сложные. Предложенные здесь варианты путей решений не являются единственно возможными. Участники олимпиады могут предложить свои способы решения. Если эти способы приводят к правильным ответам и физически обоснованы, то задача (или ее отдельные пункты) должны оцениваться максимальными баллами.

Не забывайте, что Вы должны оценивать не только конечные ответы, но и отдельные правильные шаги в ходе решения!



***Не жалейте баллов (если, конечно, есть за что!) для наших замечательных школьников!***

## Задание 10-1. Крутильные весы Кулона.

### Часть 1. Градуировка крутильных весов

1.1 При повороте коромысла весов на малый угол  $\varphi$  нити подвеса отклоняются от вертикали на угол  $\alpha$ , который определяется геометрическим соотношением

$$l\alpha = r\varphi \Rightarrow \alpha = \frac{r}{l}\varphi. \quad (1)$$

При малом угле отклонения нитей от вертикали сумма сил натяжения нити равна силе тяжести коромысла с шариками (учитывая, что косинус малого угла равен 1):

$$2N = mg \quad (2)$$

Следовательно, проекция этих сил на горизонтальную плоскость равна  $2N\alpha = mg\alpha$ . Наконец, момент этих сил равен

$$M = 2Nr\alpha = \frac{mgr}{l}\varphi. \quad (3)$$

1.2 В состоянии равновесия момент сил притяжения уравновешивается моментом сил натяжения нитей. Из формулы (3) следует, что последний пропорционален углу закручивания, поэтому и угол закручивания пропорционален действующим силам притяжения.

1.3 Момент сил притяжения равен

$$M_1 = 2F_0R. \quad (4)$$

Приравнивая найденные моменты сил, получим

$$\frac{mgr^2}{l}\varphi = 2F_0R \Rightarrow F_0 = \frac{mgr^2}{2lR}\varphi. \quad (5)$$

Следовательно, коэффициент в формуле (1) условия описывается формулой

$$K = \frac{mgr^2}{2lR}. \quad (6)$$

1.4 Пробный эксперимент показывает, что расстояние между нитями должно быть примерно равно 2 см, или

$$r \approx 1\text{см}. \quad (7)$$

1.5 Измерения зависимости периода колебаний от расстояния между нитями требуют терпения и занимают достаточно много времени, так как период колебаний составляет несколько секунд (и зависит от длины нитей). Методика проведения таких экспериментов традиционная: измеряется время нескольких (не менее 5) колебаний, после чего рассчитывается период этих колебаний. Для получения зависимости  $T(r)$  необходимо провести измерения не менее, чем для 5 значений расстояния между нитями.

1.6 Эксперимент подтверждает теоретические построения, из которых следует, что период малых колебаний обратно пропорционален расстоянию между нитями

$$T = \frac{C}{r}. \quad (8)$$

1.7 Измерение периодов колебаний при больших углах закручивания показывают, что период этих колебаний незначительно (примерно на 10%) возрастает при возрастании угла закручивания до  $90^\circ$ .

## Часть 2. Электростатические взаимодействия.

**2.1** Измерения показывают, что сила притяжения при расстоянии между шариками и пластинками порядка 1 см составляет десятые доли ньютона и быстро убывает при увеличении расстояния.

**2.2** Обработка результатов измерений показывает, что закон Кулона (закон обратных квадратов) не выполняется даже приблизительно. Это связано с тем, что в данном эксперименте измеряется сила взаимодействия заряженной пластинки с незаряженным шариком, на котором пластинка индуцирует электрические заряды, поэтому сила взаимодействия убывает в степенной зависимости

$$F = \frac{C}{r^n}. \quad (9)$$

где  $n > 2$ . Сделать более точные выводы данная установка не позволяет.

## Задание 10-2. Очень медленное движение.

### Часть 1. Масляный пузырек.

**1.1** Времена всплытия масляных пузырьков составляют несколько минут. Для доказательства равномерности движения необходимо экспериментально измерить закон движения пузырька: зависимость координаты от времени. Для этого следует использовать секундомер с памятью этапов: заранее отметить 10 точек на линейке и засечь времена прохождения пузырька через эти отметки.

График экспериментальной зависимости весьма близок к прямой, что и доказывает равномерность движения пузырька.

Наиболее точным методом расчета скорости является метод наименьших квадратов, коэффициент наклона зависимости  $x(t)$  равен средней скорости движения.

**1.2** Для получения зависимости скорости пузырька от его радиуса измерения необходимо провести не менее, чем для 10 различных пузырьков. График зависимости скорости пузырька от его радиуса является параболой, что можно доказать и линеаризацией  $v(r^2)$ . При равномерном движении разность силы Архимеда и силы тяжести уравновешивается силой сопротивления, поэтому в стационарном режиме справедливо следующее уравнение

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_0 - \rho) g = C r^\gamma v, \quad (1)$$

Из которого следует, что

$$v = \frac{4}{3C} \pi r^{3-\gamma} (\rho_0 - \rho) g, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  - плотность мыла,  $\rho$  - плотность масла.

Так как в эксперименте оказалось, что скорость пропорциональна квадрату скорости, то из этого следует, что показатель степени равен

$$\gamma = 1. \quad (3)$$

### Часть 2. Воздушный пузырек.

**2.1-2.2** Результаты измерений времен всплытия воздушных пузырьков аналогичны результатам исследования подъема масляных пузырьков, только характерные времена

всплытия примерно в 5 раз меньше. Движение воздушных пузырьков также является равномерным.

### Часть 3. Сравнение.

**3.1** Для скорости установившегося движения воздушного пузырька справедлива формула, аналогичная формуле (2), в которой можно пренебречь плотностью воздуха:

$$v_1 = \frac{4}{3C} \pi r^{3-\gamma} \rho_0 g, \quad (4)$$

Отношение скоростей двух пузырьков одинакового радиуса зависит от плотностей следующим образом:

$$\frac{v}{v_1} = \frac{(\rho_0 - \rho)}{\rho_0}, \quad (5)$$

Из этой формулы следует, что

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 - \frac{v}{v_1}, \quad (6)$$

Конечно, более предпочтительным является расчет по коэффициентам наклона зависимостей  $v(r^2)$ .





# Республиканская физическая олимпиада 2022 года (Заключительный этап)

## Экспериментальный тур

# Решения задач 11 класс (для жюри)

Уважаемые члены жюри!

Задачи, предложенные школьникам для решения на олимпиаде, не стандартные и достаточно сложные. Предложенные здесь варианты путей решений не являются единственно возможными. Участники олимпиады могут предложить свои способы решения. Если эти способы приводят к правильным ответам и физически обоснованы, то задача (или ее отдельные пункты) должны оцениваться максимальными баллами.

Не забывайте, что Вы должны оценивать не только конечные ответы, но и отдельные правильные шаги в ходе решения!



***Не жалейте баллов (если, конечно, есть за что!) для наших замечательных школьников!***

## Задание 11-1. Растекание токов и распределение потенциала.

### Часть 1. Распределение потенциала вдоль оси X

**1.1** Измерение потенциала следует проводить с шагом не более 1 см, в противном случае провести тщательный анализ этой зависимости невозможно.

График полученной зависимости нелинейный, напоминает кубическую параболу. Функция, описывающая полученную зависимость, нечетная.

**1.2** В рамках предположения о том, что зависимость потенциала от расстояния до источника обратно пропорциональна расстоянию до источника (как потенциал поля точечного заряда), функция описывающая полученную зависимость  $\varphi(x)$  должна иметь вид

$$\varphi = C \left( \frac{1}{l-x} - \frac{1}{l+x} \right) = C \frac{2x}{l^2 - x^2} \quad (1)$$

Эта зависимость допускает линеаризацию

$$\frac{1}{x\varphi} = \frac{l^2 - x^2}{C} \quad (2)$$

Однако, замена переменных  $Y = \frac{1}{x\varphi}$ ,  $X = x^2$  и построение графика зависимости  $Y(X)$

показывает, что данная зависимость не является линейной. Таким образом, предположение об обратной зависимости потенциала от расстояния не выполняется.

**1.3** Для определения параметров зависимости  $\varphi_0(x) = ax + bx^3$  ее необходимо привести к виду

$$\frac{\varphi_0(x)}{x} = a + bx^2. \quad (3)$$

В этом случае для расчета коэффициентов  $a, b$  можно воспользоваться методом наименьших квадратов.

**1.4** Так как растекание токов происходит в плоскости, то наиболее разумным является предположение о том, что зависимость потенциала от расстояния до источника является логарифмической:

$$\varphi = \varphi_0 \ln \frac{r_0}{r}. \quad (4)$$

### Часть 2. Распределение поля в плоскости.

**2.1** Измерение потенциала проводится описанным в условии методом.

**2.2** Эквипотенциальная поверхность есть геометрическое место точек, имеющих один и тот же потенциал. На плоскости эквипотенциальная поверхность является линией пересечения трехмерной эквипотенциальной поверхности с плоскостью. Крайняя точка требуемой линии задана в условии, потенциал в этой точке измерен, обозначим его  $\varphi_1$ . Для построения всей линии можно воспользоваться двумя методами.

Первый, экспериментальный: проводя сканирование потенциала вдоль некоторой прямой параллельной оси  $x$  (с некоторым шагом, например, те же 2 см) найти на этой прямой точку с тем же значением потенциала.

Второй, теоретический: используя данные проведенных измерений провести линейную интерполяцию значений потенциалов между двумя узловыми точками, и по ней рассчитать координаты точек, имеющих потенциал  $\varphi_1$ .

Заметим, что данная эквипотенциальная линия является замкнутой и охватывает один из подводющих контактов.

**2.3** Так как напряженность поля равна производной от потенциала, взятой с противоположным знаком

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{d\varphi}{dx} \\ E_y &= -\frac{d\varphi}{dy} \end{aligned} \quad (5)$$

То для построения направления вектора напряженности, производные можно приближенно заменить отношением конечных разностей,

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{h} \\ E_y &= -\frac{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}}{h} \end{aligned} \quad (6)$$

Расчеты по этим простым формулам следует провести по всем точкам, значения потенциалов измерены в ходе выполнения пункта 2.1.

## Задание 11-2. Стекланный песок.

### Часть 1. Собирающая линза.

**1.1** Для измерения фокусного расстояния линз с высокой точностью можно измерить зависимость смещения луча на экране  $x$  от смещения линзы  $z$ . Как следует из рисунка эти величины связаны геометрическим соотношением

$$\frac{z}{F} = -\frac{x}{L-F} \quad (1)$$

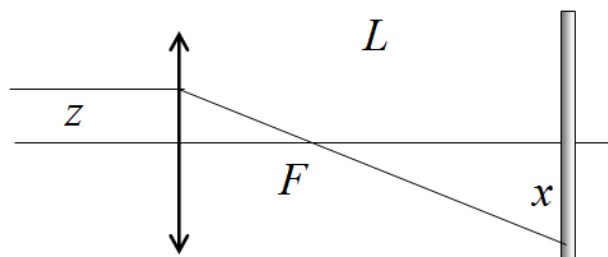
Из которого следует, что

$$x = -\frac{L-F}{F} z \quad (2)$$

По коэффициенту наклона легко измеряемой зависимости  $x(z)$  можно рассчитать фокусное расстояние собирающей линзы.

Аналогично можно получить формулу и провести необходимые измерения и для рассеивающей линзы.

**2.2** Чтобы получить увеличенное изображение стекланных песчинок, необходимо использовать собирающую линзу, причем песчинки должны располагаться вблизи фокальной плоскости линзы. Для подсветки песчинок можно использовать рассеивающую линзу.



**2.3** После получения изображения следует измерить диаметр изображения песчинок  $D$ . Выразим этот размер через параметры установки.

$$D = D_0 \frac{b}{a} . \quad (3)$$

где  $a, b$  расстояния от предмета (песчинка) до линзы и от линзы до экрана с изображением песчинки, соответственно.

В эксперименте проще измерять расстояние от линзы до экрана, поэтому величину  $a$  можно выразить из формулы линзы:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F} \Rightarrow a = \frac{bF}{b - F} . \quad (4)$$

Подстановка этого выражения в формулу (3) дает:

$$D = D_0 \frac{b - F}{F} . \quad (5)$$

Таким образом, зависимость размера изображения песчинки от величины  $b$  является линейной. Экспериментальное исследование этой зависимости с последующей обработкой по методу наименьших квадратов позволяет рассчитать размер песчинки  $D_0$  с небольшой погрешностью.

### **Часть 3. Рассеяние света песком.**

**3.1** Для получения картин рассеяния света удобнее использовать штатив с лапками для крепления оптических элементов.

При рассеянии вперед наблюдается монотонное изменение интенсивности света на экране, никаких характерных элементов в этой картине не наблюдается.

При рассеянии света небольшой кучкой песчинок иногда на экране возникают ярко освещенные с четкими краями круглые световые пятна. Их возникновение обусловлено переотражением света от нескольких песчинок.

**3.2** При рассеянии назад регулярно возникают описанные круглые пятна света. Поэтому предположение о переотражении света, высказанное в предыдущем пункте подтверждается. Возникновение этих круглых пятен аналогично возникновению радуги при преломлении света в капельках воды.

### **Часть 4. Светоотражающая полоска.**

**4.1** В зависимости от места попадания света на светоотражающую полоску на экране возникают разнообразные световые пятна, форма и положение которых заметно отличаются при смещении луча по полоске.

**4.2** При некоторых положениях луча на полоске в отраженном свете наблюдаются круглые пятна, подобные пятнам, возникающим при рассеянии света на стеклянных шариках. Это наблюдение говорит о том, что в светоотражающий слой полоски включены стеклянные шарики.