



# Республиканская физическая олимпиада 2024 года (Заключительный этап)

## Теоретический тур

### 10 класс.

**Внимание! Прочтите в первую очередь.**

1. Полный комплект состоит из 3 заданий. Для вашего удобства вопросы, на которые Вам необходимо ответить, помещены в рамки.
2. На отдельном листе приведены формулы приближенных вычислений, используйте их при решении задач, там, где это необходимо.
3. Решения задач выполняйте на отдельных чистых рабочих листах. Самостоятельно разделите их на черновики и чистовые листы. Рекомендуем сначала решать в черновике, а затем красиво оформить решение на чистовых листах. Решение каждого задания начинайте с нового чистового листа. В решении приведите рисунки (в некоторых заданиях рисунки необходимы, даже в том случае, когда это не оговорено в условии), исходные уравнения с кратким обоснованием, решения уравнений (комментарии к математическим выкладкам не требуются), окончательные результаты. Окончательные решения обязательно занесите в листы ответов. Чистовые листы пронумеруйте. Черновые листы после окончания работы перечеркните. **Черновики проверяться не будут!**
4. Листы ответов содержат отдельные разделы в соответствии с пунктами полученных Вами заданий. Конечные формулы и требуемые численные значения занесите в соответствующие выделенные поля. Если по условию заданий от Вас требуется построение графика, используйте подготовленные бланки в Листах ответов, не забудьте подписать и оцифровать оси координат.
5. Все ваши работы сканируются, поэтому пишите только на одной стороне листа. Подписывать рабочие листы и листы ответов запрещается.
6. В ходе работы можете использовать ручки, карандаши, чертежные принадлежности, калькулятор.
7. После окончания работы сложите листы в следующем порядке: листы ответов; пронумерованные чистовые листы; перечеркнутые черновики.
8. Со всеми вопросами, связанными с условиями задач, обращайтесь к организаторам олимпиады.



**Пакет содержит:**

- титульный лист (1 стр.);
- лист математических подсказок (1 стр.);
- условия 3 теоретических заданий (7 стр.);
- листы ответов (4 стр.);

### Формулы приближенных вычислений.

При решении задач Вам могут понадобиться следующие приближенные формулы

1.  $(1 + x)^\gamma \approx 1 + \gamma x$

формула справедлива при любых (целых, дробных, положительных, отрицательных) значениях степени  $\gamma$ .

$$\sin x \approx x$$

2.  $\cos x \approx 1 - \frac{x^2}{2}$

аргументы тригонометрических функций должны быть заданы в радианах.

3.  $e^x \approx 1 + x$ .

### Комментарии.

1. Во всех формулах величина  $x$  безразмерная и значительно меньше 1:  $x \ll 1$
2. Для использования этих формул, прежде всего необходимо привести вашу формулу к стандартному виду, которые даны здесь.
3. В ходе приближенных преобразований соблюдайте правило соблюдения порядка малости: если вы отбрасываете малые величины порядка  $x^2$  и выше – отбрасывайте их сразу в промежуточных выкладках; если вы сохраняете величины определенного порядка, то сохраняйте их во всех преобразованиях

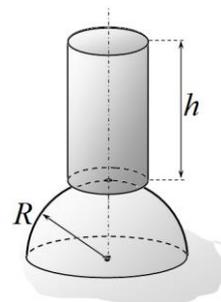
## Задание 1. Цирковая разминка

Это задание состоит из двух не связанных между собой задач.



### Задача 1. Девочка на шаре

Построим предельно упрощенную модель этого изящного циркового номера: первое – считаем, что шар закреплен и неподвижен; второе – считаем девочку сплошным однородным цилиндром; третье – считаем, что трение между поверхностью шара и основанием цилиндра достаточно велико, так, что цилиндр может прокатываться по поверхности шара без проскальзывания. Обозначим радиус шара  $R$ , высоту цилиндра  $h$ .



1. Определите, при каких значениях отношения  $\frac{h}{R}$  цилиндр может устойчиво стоять вертикально на вершине шара.

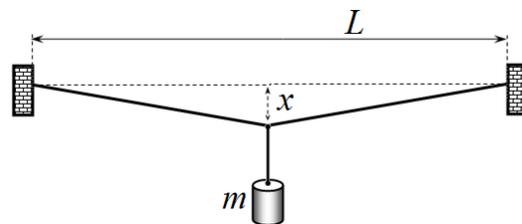
### Задача 2. Канатоходцы



Исполнение этого циркового номера требует серьезной технической подготовки. Для исследования возможности хождения по канату проводится следующий модельный эксперимент.

Медная проволока длины  $L = 2,0\text{ м}$  подвешена горизонтально между двумя неподвижными упорами. Массой проволоки и ее натяжением в горизонтальном положении следует пренебрегать. К середине проволоки подвешивают груз массы  $m$ . При этом проволока провисает на некоторую величину  $x$ .

В ниже приведена диаграмма растяжения проволоки – зависимость силы упругости  $F$ , возникающей в проволоке, от ее относительной деформации  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{L}$ . Там же приведены значения



относительной деформации и соответствующей силы упругости в двух характерных точках. Участок диаграммы 0-1 – линейный (область упругости), точка 2 – точка разрыва.

Ускорение свободного падения считать равным  $g = 9,8 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$ .

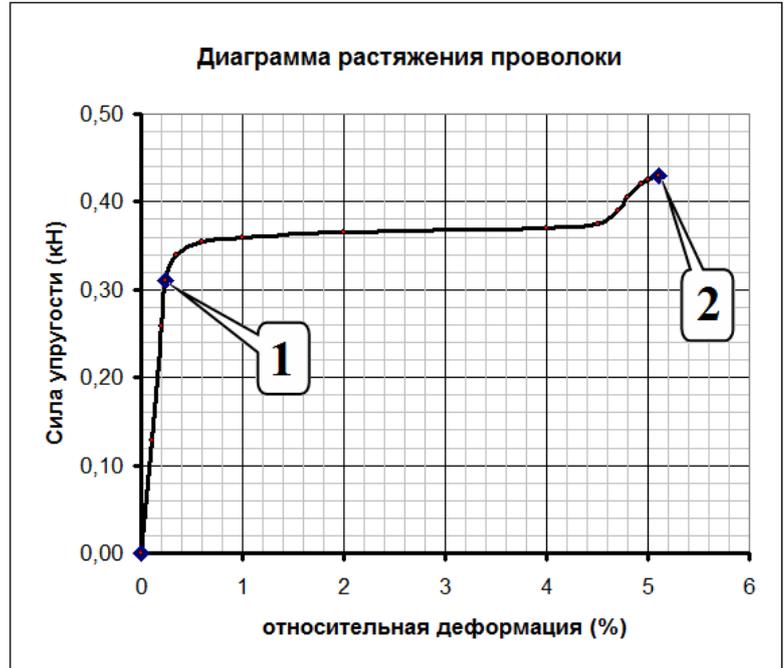
Используя приведенные данные, рассчитайте:

- 2.1 Величину провисания проволоки  $x$ , если масса подвешенного груза равна  $m_1 = 2,0\text{ кг}$ .

2.2 Максимальную массу груза  $m_2$ , который можно повесить к этой проволоке (до ее разрыва)

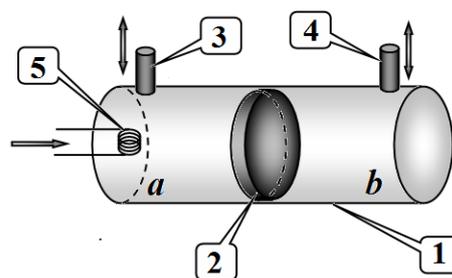
Диаграмма растяжения проволоки.

№	$\varepsilon(\%)$	$F, \text{кН}$
0	0,00	0,00
1	0,24	0,31
2	5,10	0,43



## Задание 2. Газовые законы

Для проведения экспериментов используется следующая установка. Закрытый теплоизолированный цилиндрический сосуд 1 разделен на две части *a* и *b* подвижным поршнем 2. Объем поршня значительно меньше объема сосуда. Через небольшие трубки с кранами 3 и 4 в обе части сосуда можно закачивать газ. В части сосуда *a* находится нагреватель 5, с помощью которого газу можно передавать теплоту.



Теплоемкостью сосуда и поршня можно пренебречь. Трением поршня о стенки сосуда также можно пренебречь. Поршень является теплопроводящим, поэтому газы в разных частях сосуда могут медленно обмениваться теплотой. Во всех экспериментах используется аргон (одноатомный газ). Внутренний объем сосуда равен  $2V_0$ .

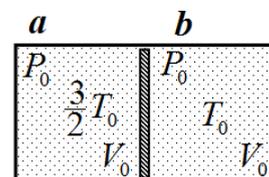
### Часть 1. Горизонтальный сосуд.

В листе ответов приведена Таблица 1, в которой показаны последовательные состояния газов и примерное положение поршня. В этой Таблице приведены известные значения параметров газов. Вам необходимо заполнить эту таблицу, привести значения параметров газов (давление, объем температура) в различных состояниях.

При проведении расчетов, используйте обозначения параметров газов в различных состояниях, приведенные в Таблице 1. При решении уравнений можете использовать численные данные, приведенные в условии. Допускается проведение промежуточных численных расчетов. Все ответы должны быть выражены через значения параметров  $P_0, V_0, T_0$ .

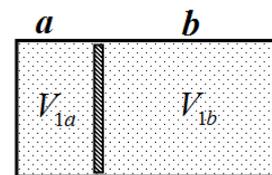
Помните, что обыкновенные дроби – числа точные, а десятичные – приближенные!

Сосуд расположили горизонтально, поршень делит сосуд на две равные части. Обе части сосуда заполняют газом и закрывают краны. При этом давление газов в обеих частях сосуда одинаковы и равны  $P_0$ .



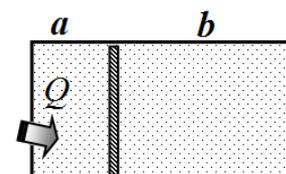
Температура газа в части *b* равна  $T_0$ , а в части *a* –  $\frac{3}{2}T_0$ .

Поршень начинает медленно смещаться и через какой-то промежуток времени приходит в состояние равновесия.



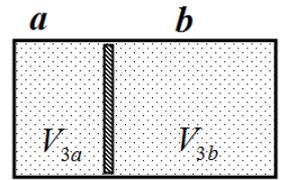
**1.1** Рассчитайте значения параметров газов (давления, объемы, температуры) в обеих частях сосудов, после установления теплового равновесия.

После достижения равновесия, газу в части *a* с помощью нагревателя быстро сообщают количество теплоты равное  $Q = \frac{1}{2} P_0 V_0$ .



**1.2** Пренебрегая смещением поршня и теплопередачей через поршень за время нагрева, рассчитайте значение параметров газов после прекращения нагревания.

После прекращения нагревания поршень приходит в движение и переходит в состояние равновесия.

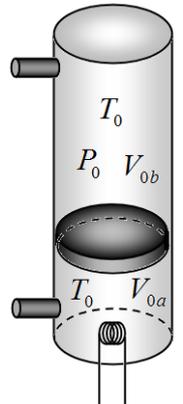


**1.3** Рассчитайте значения параметров газов в обеих частях сосудов, после установления теплового равновесия.

**Часть 2. Вертикальный сосуд.**

Обе части сосуда заполнили одинаковыми количествами аргона, и расположили сосуд вертикально.

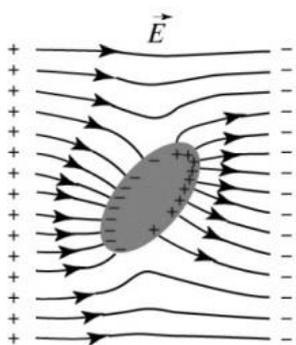
Поршень находится в равновесии. При этом температуры газа в обеих частях сосуда равны, отношение объемов частей сосуда равно  $\frac{V_{0b}}{V_{0a}} = \frac{3}{1}$ , давление газа в верхней части сосуда -  $P_0$ . (которое отличается начального давления в Части 1).



**2.** Рассчитайте, какое количество теплоты  $Q$  необходимо сообщить газу, чтобы после достижения равновесия отношение объемов частей сосуда стало равным  $\frac{V_{1b}}{V_{1a}} = \frac{2}{1}$ .

Примечание. Изменением потенциальной энергии взаимодействия газа с Землей можно пренебречь.

### Задание 3. Поле в диэлектрике



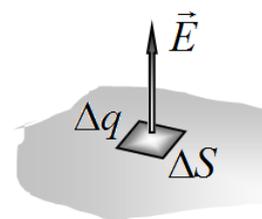
Диэлектрик, помещенный во внешнее электрическое поле, поляризуется, т.е. происходит частичное смещение электрических зарядов (электронов и ядер). Вследствие чего на поверхности **однородного** диэлектрика возникают индуцированные (поляризационные) заряды, которые создают собственное электрическое поле, как внутри диэлектрика, так и вне его. Если силовые линии электрического поля везде на границе диэлектрика **перпендикулярны** этой границе, то напряженность электрического поля внутри диэлектрика оказывается в  $\epsilon$  раз меньше, чем напряженность поля при отсутствии диэлектрика (где  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость диэлектрика).

В данном задании Вам необходимо продемонстрировать понимание описанного механизма изменения поля в диэлектрике.

Если электрические заряды распределены по поверхности, то удобно ввести такую характеристику зарядов, как их поверхностная плотность:

$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S}.$$

(1)



где  $\Delta q$  - заряд, находящийся на малой площадке площади  $\Delta S$ .

**Во всех частях этого задания предполагается, что электрические заряды распределены по плоским поверхностям равномерно  $\sigma = const$ , а создаваемое ими электрическое поле является однородным. Т.е. краевыми эффектами следует пренебрегать.**

**Считайте, что вне диэлектриков находится вакуум.**

#### Часть 1. Нормальное поле

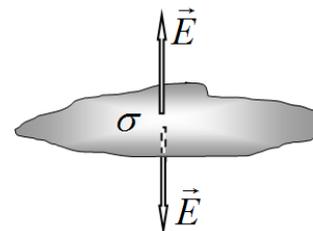
В учебнике физики для 10 класса приведена формула для емкости плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}.$$

(2)

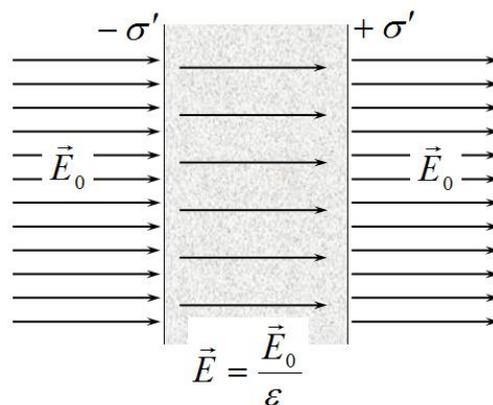
где  $S$  - площадь пластин (обкладок) конденсатора,  $d$  - расстояние между обкладками,  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость вещества, находящегося между обкладками,  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная.

**1.1** Бесконечная равномерно заряженная с поверхностной плотностью заряда  $\sigma$  плоскость создает однородное электрическое поле, напряженности  $\vec{E}$ .



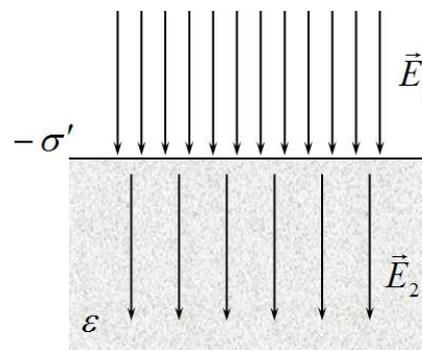
**1.1** Используя формулу для емкости плоского конденсатора (2), выразите модуль напряженности электрического поля  $E$ , создаваемого зарядами на плоскости, через их поверхностную плотность  $\sigma$ .

**1.2** В однородное электрическое поле напряженности  $\vec{E}_0$  помещена незаряженная плоскопараллельная пластина, изготовленная из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ . Силовые линии поля перпендикулярны пластине.



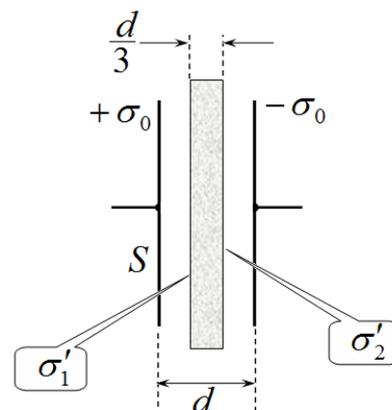
**1.2** Найдите поверхностную плотность индуцированных зарядов на пластине  $\sigma'$ . Выразите значение этой плотности а) через напряженность поля  $E_0$  вне пластины; б) через напряженность поля  $E$  внутри пластины.

**1.3** Силовые линии электрического поля перпендикулярны плоской границе однородного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  (нижняя граница находится бесконечно далеко). Над диэлектриком напряженность поля равна  $\vec{E}_1$ .



**1.3** Найдите поверхностную плотность индуцированных на границе зарядов  $\sigma'$ . Выразите ее через напряженность поля внутри диэлектрика  $E_2$ .

**1.4** Плоский конденсатор состоит из двух проводящих параллельных пластин площади  $S$ , находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга, которое значительно меньше размеров пластин. Между пластинами находится непроводящая плоскопараллельная пластинка толщины  $\frac{d}{3}$ , расположенная параллельно пластинам-обкладкам конденсатора. На обкладках конденсатора равномерно распределены электрические заряды, поверхностные плотности которых равны  $\pm \sigma_0$ .



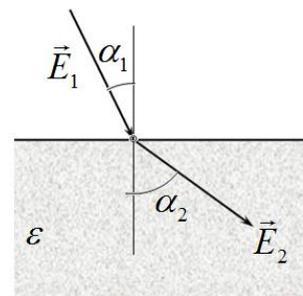
**1.4.1** Найдите поверхностные плотности зарядов  $\sigma'_1, \sigma'_2$  на поверхностях диэлектрической пластинки (укажите знаки этих зарядов).

**1.4.2** Найдите электрическую емкость этого конденсатора  $C_0$ .

**1.4.3** Найдите давление, которое оказывает электрическое поле на одну из граней диэлектрической пластинки. Укажите, растягивается или сжимается пластинка под действием электрического поля.

## Часть 2. Наклонное поле

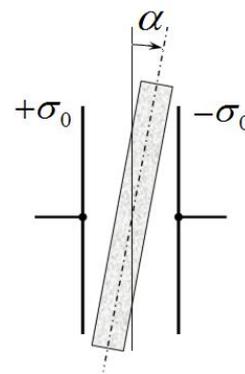
**2.1** Силовые линии однородного электрического поля напряженности  $\vec{E}_1$  образуют угол  $\alpha_1$  с нормалью к плоской границе диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ . Внутри диэлектрика вектор напряженности однородного электрического поля  $\vec{E}_2$  направлен под углом  $\alpha_2$  к нормали к границе диэлектрика.



**2.1.1** Получите «закон преломления» силовых линий, т.е. соотношение, связывающее углы  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon$ .

**2.1.2** Найдите отношение модулей напряженностей полей  $\frac{E_2}{E_1}$  как функцию диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  и угла  $\alpha_1$ .

**2.2** Диэлектрическую пластину конденсатора, описанного в п. 1.4, повернули на угол  $\alpha$ .



**2.2.1** Найдите емкость конденсатора  $C$  с повернутой пластиной.

**2.2.2** Найдите относительное изменение емкости конденсатора  $\frac{C - C_0}{C_0}$  при повороте пластины на малый угол  $\alpha$ . ( $C_0$  - емкость конденсатора, найденная в п. 1.4.2.)

*Примечание.* Считайте, что при повороте пластины распределение зарядов на обкладках конденсатора и на гранях диэлектрической пластины остается равномерным, а электрическое поле в зазорах между обкладками пластинкой остается однородными перпендикулярным обкладкам конденсатора.

## Листы ответов

### Задание 1. Цирковая разминка

#### Задача 1. Девочка на шаре

1. Цилиндр может стоять на шаре при

$$\frac{h}{R}$$

#### Задача 2. Канатоходцы

2.1 Провисание проволоки равно (формула и численное значение)

$$x =$$

2.2 Максимальная масса груза равна (формула и численное значение)

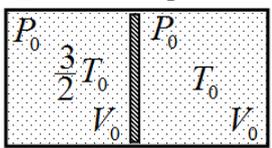
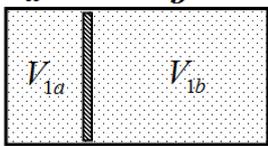
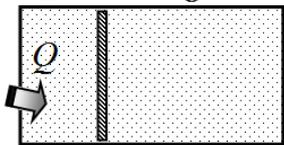
$$m_2 =$$

## Листы ответов

### Задание 2. Газовые законы

#### Часть 1. Горизонтальный сосуд.

Таблица 1. Параметры газов

№	рисунок	параметры газа в части <b>a</b>	параметры газа в части <b>b</b>
<b>1.1</b>		$P_{0a} = P_0$	$P_{0b} = P_0$
		$V_{0a} = V_0$	$V_{0a} = V_0$
		$T_{0a} = \frac{3}{2}T_0$	$T_{0b} = T_0$
<b>1.1</b>		$P_{1a} =$	$P_{1b} =$
		$V_{1a} =$	$V_{1b} =$
		$T_{1a} =$	$T_{1b} =$
<b>1.2</b>		$P_{2a} =$	$P_{2b} =$
		$V_{2a} =$	$V_{2b} =$
		$T_{2a} =$	$T_{2b} =$
<b>1.3</b>		$P_{3a} =$	$P_{3b} =$
		$V_{3a} =$	$V_{3b} =$
		$T_{3a} =$	$T_{3b} =$

#### Часть 2. Вертикальный сосуд

2. Количество переданной теплоты

$$Q =$$

### Листы ответов

#### Задание 3. Поле в диэлектрике

1.1 Напряженность электрического поля

$$E =$$

1.2 Поверхностная плотность зарядов

$$\sigma'(E_0) = \quad \sigma'(E) =$$

1.3 Поверхностная плотность зарядов

$$\sigma'(E_2) =$$

1.4.1 Поверхностные плотности зарядов

$$\sigma'_1 = \quad \sigma'_2 =$$

1.4.2 Электрическую емкость конденсатора

$$C_0 =$$

1.4.3 Давление электрического поля

$$P =$$

2.1.1 «Закон преломления» силовых линий

2.1.2 Отношение модулей напряженностей полей

$$\frac{E_2}{E_1} =$$

**2.2.1** Емкость конденсатора с повернутой пластиной

$$C =$$

**2.2.2** Относительное изменение емкости конденсатора

$$\frac{C - C_0}{C_0} =$$