



# Республиканская физическая олимпиада 2025 года (III этап)

## Теоретический тур

### 10 класс.

**Внимание! Прочтите это в первую очередь!**

1. Полный комплект состоит из трех заданий. Для вашего удобства вопросы, на которые Вам необходимо ответить, помещены в рамки.

2. Каждое задание включает условие задания и Листы ответов. Для решения задач используйте рабочие листы. Часть из них используйте в качестве черновиков. После окончания работы черновые листы перечеркните.

В чистовых рабочих листах приведите решения задач (рисунки, исходные уравнения, математические преобразования, графики, окончательные результаты). Жюри будет проверять чистовые рабочие листы. Кроме того, каждое задание включает Листы ответов. В соответствующие графы Листов ответов занесите окончательные требуемые ответы. Для построения графиков, которые требуется по условию задачи, в Листах ответов подготовлены соответствующие бланки. Графики стройте на этих бланках. Дублировать их в рабочих листах не требуется.

3. При оформлении работы каждое задание начинайте с новой страницы. При недостатке бумаги обращайтесь к организаторам!

4. Подписывать рабочие листы запрещается.

5. В ходе работы можете использовать ручки, карандаши, чертежные принадлежности, инженерный калькулятор.

6. Со всеми вопросами, связанными с условиями задач, обращайтесь к организаторам олимпиады.



Пакет заданий содержит:

- титульный лист (1 стр.);

- условия 3 теоретических заданий с Листами ответов (9 стр.).

### Задание 10-1. Прогрессивная динамика

В данном задании действие силы тяжести не учитывать. Внимание! Рисунки носят качественный характер: реальные пропорции сил на них по понятным причинам не соблюдены.

**1.1** На материальную точку массой  $m = 36,4$  кг действуют шесть сил (Рис. 1), расположенных в одной плоскости, самая «маленькая» из которых равна  $F_1 = 10$  Н и направлена вдоль оси  $Ox$ . Известно, что каждая следующая сила больше предыдущей в два раза и повернута на угол  $\alpha = 60^\circ$  (см. Рис. 1). Найдите ускорение  $\vec{a}_1$  материальной точки под действием данной системы сил.

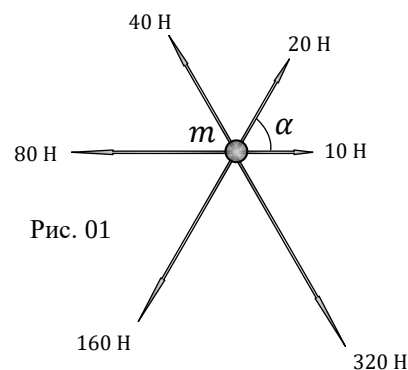


Рис. 01

**1.2** Рассмотрим общий случай. Пусть на материальную точку массой  $m$  (Рис. 2) действует система из  $n$  сил ( $\vec{F}_1; \vec{F}_2; \vec{F}_3; \dots; \vec{F}_{n-1}; \vec{F}_n$ ), расположенных в одной плоскости на одинаковом угловом расстоянии  $\alpha = \frac{2\pi}{n}$  друг от друга. Известно, что модуль  $F_{i+1}$  каждой следующей силы в  $k$  раз больше модуля  $F_i$  предыдущей. Найдите ускорение  $\vec{a}_2$  материальной точки под действием описанной системы сил.

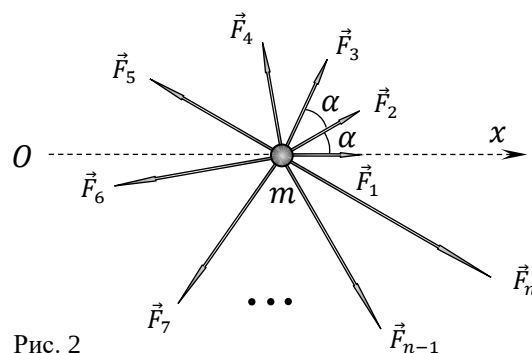


Рис. 2

**1.3** Используя общее выражение, полученное для  $\vec{a}_2$  в предыдущем пункте, вычислите ускорение  $\vec{a}_1$  для первого пункта задачи.

**Лист ответов. Задание 10-1. Прогрессивная динамика**

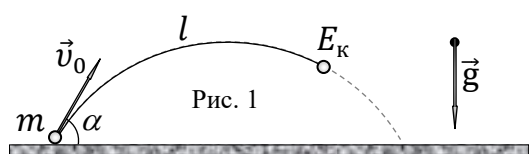
**1.1** Ускорение  $\vec{a}_1$  материальной точки:

**1.2** Ускорение  $\vec{a}_2$  материальной точки:

**1.3** Вычисление ускорения  $\vec{a}_1$  для первого пункта задачи по формуле, полученной п. 1.2:

### Задание 10-2. Энергичный бросок

Небольшой камешек массой  $m$  бросили под некоторым углом  $\alpha$  к горизонтальной поверхности (Рис. 1) с некоторой начальной скоростью  $\vec{v}_0$ . Зависимость кинетической энергии  $E_k$



камешка (см. Рис. 1) от пройденного им пути  $l$  в процессе полёта представлена на Рис. 2 в безразмерных координатах  $E_k/E_0$  и  $l/l_0$  (где  $E_0$  и  $l_0$  – некоторые размерные масштабные множители).

Соппротивлением воздуха при движении камешка пренебречь. Ускорение свободного падения  $g$ .

**Часть 1. «Только формулы»** В этой части задачи Вам предстоит самое простое: вывести формулы для различных физических параметров системы через известные величины:  $m$ ,  $E_0$ ,  $g$ .

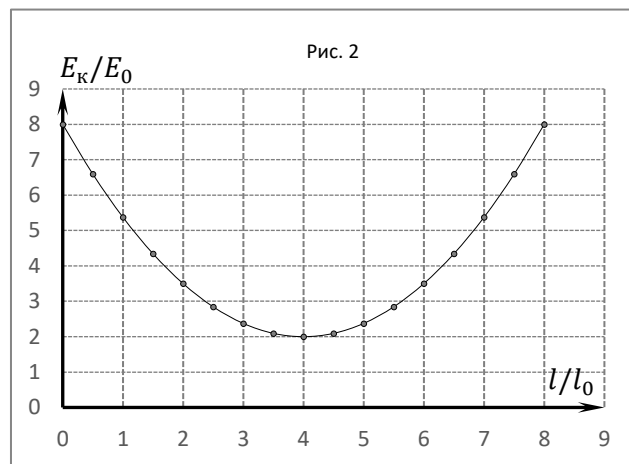
**1.1** Найдите кинетические энергии камешка:  $E_1$  – в момент бросания,  $E_2$  – в верхней точке траектории,  $E_3$  – при падении на землю.

**1.2** Определите начальную скорость  $v_0$  камешка при броске.

**1.3** Получите формулу для определения угла  $\alpha$ , под которым камешек бросили к горизонту.

**1.4** Выведите формулу для времени полета  $t_{\text{п}}$  камешка.

**1.5** Найдите максимальную высоту  $h_{\text{max}}$  и дальность  $S$  полета камешка при таком броске.



**Часть 2. «Только расчёты»** В этой части задачи Вам предстоит самое сложное – вычислить значения физических параметров системы по формулам, полученным в первой части. При расчетах примите:  $m = 1,00$  кг,  $E_0 = 10,0$  Дж,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

**2.1** Вычислите значения всех физических параметров системы из пунктов 1.1 – 1.4.

**2.2** Вычислите максимальную высоту  $h_{\text{max}}$  и дальность  $S$  полета камешка из пункта 1.5. Получите численное уравнение  $y(x)$  траектории камешка, схематически её постройте. Как можно точнее оцените длину траектории  $l_{\text{max}}$  камешка.

**2.3** Определите численное значение размерного масштабного множителя  $l_0$ .

**Лист ответов. Задание 10-2. Энергичный бросок**

**1.1** Кинетическая энергия камешка  $E_1$ :

Кинетическая энергия камешка  $E_2$ :

Кинетическая энергия камешка  $E_3$ :

**1.2** Начальная скорость  $v_0$ :

**1.3** Формула для определения угла  $\alpha$ :

**1.4** Формула для времени полета  $t_{\text{п}}$  камешка:

**1.5** Максимальная высота  $h_{\text{max}}$  и дальность  $S$  полета:

2.1  $E_1 =$  ;  $E_2 =$  ;  $E_3 =$  ;  
 $v_0 =$  ;  $\alpha =$  ;  $t_{\Pi} =$  .

2.2  $h_{max} =$  ;  
 $S =$  .  
 $l_{max} =$  .

2.3  $l_0 =$  .

### Задание 10-3. Цикл Карно

В современном мире успешно работают миллионы машин, основная часть которых использует как бензиновые, так и дизельные двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Доля электромобилей на мировом рынке в настоящий момент крайне невелика – около 2 %.



Рис. 1

При создании ДВС в середине XIX века перед инженерами и конструкторами встал важный прикладной (и научный!) вопрос: а какой тепловой двигатель имеет максимальный термодинамический КПД, т.е. является идеальной тепловой машиной?

Заметим, что цикл Отто (бензиновый двигатель) и цикл Дизеля (дизельный двигатель) не являются идеальными тепловыми циклами, хотя автомобили, работающие по этим циклам, и составляют львиную долю современного производства. Так что же, наша цивилизация так глупа?

Впервые идеальная тепловая машина была описана в 1824 г. французским физиком и инженером Сади Карно (Рис. 1) в скромной работе «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Заметим, что эта сравнительно небольшая работа содержала «всего лишь» 65 страниц, 5 поясняющих текст рисунков и 2 теоремы.

Интересно, что сам автор так и не считал необходимым изобразить графически свой знаменитый цикл (Рис. 2), известный сегодня каждому школьнику, он привёл только его точные описания ...

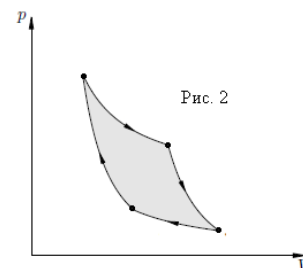


Рис. 2

С. Карно был талантливым учеником известного математика и физика Семиона Дени Пуассона, который в 1823 г. впервые получил уравнение адиабатного процесса (уравнение Пуассона) и предложил тему дальнейшего перспективного исследования молодому Карно.

Интуиция и предчувствия не подвели Пуассона – пионерская работа активного Карно со временем стала фундаментальной, принесла автору мировую известность и положила начало новому разделу физики – термодинамике.

*Справочные данные и параметры рассматриваемой системы:* если  $a^n b^m = \text{const}$ , то при малых  $\Delta a$  и  $\Delta b$  ( $\Delta a \ll a$ ,  $\Delta b \ll b$ ) справедливо равенство:  $n \frac{\Delta a}{a} + m \frac{\Delta b}{b} = 0$  (справедливо также и обратное утверждение); затонированная площадь  $S$  (Рис. 3) под гиперболой  $y = \frac{k}{x}$  вычисляется через натуральный логарифм по формуле  $S = k \cdot \ln\left(\frac{x_2}{x_1}\right)$ , молярная газовая постоянная  $R = 8,31$  Дж/(моль · К).

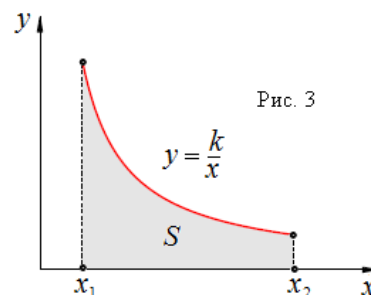


Рис. 3

#### Часть 1. Адиабатный процесс

Термодинамический процесс, проводимый без теплообмена ( $Q = 0$ ) с окружающей средой (т.е. в теплоизолированной системе), называется *адиабатным* процессом. Адиабатными являются многие быстропротекающие процессы (взрыв, быстрое расширение (сжатие) газа, распространение звуковой волны), процесс подъема теплого воздуха с поверхности земли с последующим охлаждением, конденсацией пара и образованием облаков и т.д.

**1.1** Теплоёмкость  $c_V^M$  идеального газа, взятого в количестве  $\nu = 1$  моль ( $m = M$ ), называется молярной теплоёмкостью. Найдите молярную теплоёмкость  $c_V^M$  идеального одноатомного газа при изохорном процессе, т.е. при постоянном объёме ( $V = \text{const}$ ). Запишите формулу для внутренней энергии  $U$  идеального одноатомного газа через  $c_V^M$  и в дальнейшем используйте её для любого идеального газа.

1.2 Выразите молярную теплоемкость идеального газа  $c_p^M$  при постоянном давлении ( $p = const$ ), т.е. при изобарном процессе, через  $c_v^M$ .

1.3 Получите уравнение адиабатного процесса для любого (не только одноатомного) идеального газа в переменных  $(T, V)$  с показателем адиабаты  $\gamma = \frac{c_p^M}{c_v^M}$ .

1.4 В полученном уравнении сделайте замену переменных и запишите уравнение адиабатного процесса для произвольного идеального газа в «традиционном» виде, т.е. в переменных  $(p, V)$ .

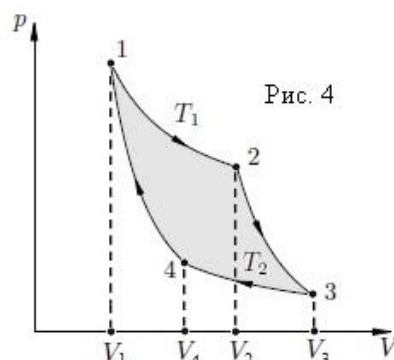
1.5 Схематически изобразите на одной  $(p, V)$  – диаграмме ход адиабаты и изотермы идеального газа. Кратко охарактеризуйте особенности построенных графиков.

## Часть 2. Идеальный цикл (цикл Карно)

Карно доказал, что идеальная тепловая машина, реализующая  $\eta_{max}$  максимальный термодинамический КПД при заданных температурах нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ), должна работать по обратимому циклу (Рис. 4), состоящему из двух изотерм и двух адиабат (вторая теорема Карно).

Более того,  $\eta_{max}$  для цикла Карно не зависит от типа рабочего тела (т.е. не важно, какой именно идеальный газ используется!). Он определяется только температурами нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$  (первая теорема Карно).

При идеальном цикле изотерма  $1 \rightarrow 2$  осуществляется при большей температуре  $T_1$ , далее следует адиабатный переход  $2 \rightarrow 3$ , изотерма  $3 \rightarrow 4$  при меньшей температуре  $T_2$  и, наконец, адиабатное возвращение  $4 \rightarrow 1$  к начальной точке цикла (см. Рис. 4). Величины  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$  для цикла Карно считайте известными.

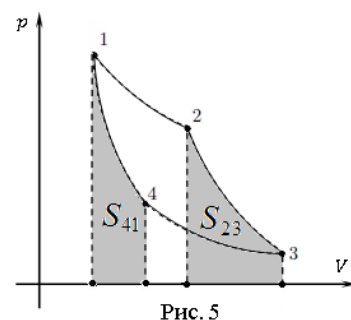


2.1 Докажите «правило объемов» для цикла Карно, согласно которому произведение «крайних» объемов равно произведению «средних»:  $V_1 V_3 = V_2 V_4$ .

2.2 Докажите «правило адиабатных площадей» для данного цикла, которое утверждает, что площади  $S_{23}$  и  $S_{41}$  под адиабатами  $2 \rightarrow 3$  и  $4 \rightarrow 1$  на  $(p, V)$  – диаграмме цикла Карно (Рис. 5) одинаковы:  $S_{23} = S_{41}$ .

2.3 Найдите количество теплоты  $Q_1$ , полученной идеальным газом от нагревателя, и количество теплоты  $Q_2$ , отданной им холодильнику.

2.4 Выведите формулу для максимального термодинамического КПД  $\eta_{max}$  цикла Карно, осуществляемого при данных температурах нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$ .





**Лист ответов. Задание 10-3. Цикл Карно**

1.1 Формула для внутренней энергии  $U$  идеального одноатомного газа через  $c_V^M$ :

1.2 Молярная теплоемкость идеального газа  $c_p^M$ :

1.3 Уравнение адиабатного процесса для произвольного идеального газа в переменных  $(T, V)$  с показателем адиабаты  $\gamma = \frac{c_p^M}{c_V^M}$ :

1.4 Уравнение адиабатного процесса для любого идеального газа в переменных  $(p, V)$ :

1.5 Схематическая диаграмма адиабаты и изотермы:



2.1 – 2.2 См. доказательства в рабочих листах.

2.3 Количество теплоты  $Q_1$ :

Количество теплоты  $Q_2$ :

2.4 КПД цикла Карно  $\eta_{max}$ :