



# Республиканская физическая олимпиада 2023 года (III этап)

## Теоретический тур

### 11 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.



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

5. Подписывать рабочие листы запрещается.

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

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

Пакет заданий содержит:

- титульный лист (1 стр.);
- условия 3 теоретических задач с Листами ответов (14 стр.).

### Задание 11-1. «Кардиограмма» тепловой машины.



В данном задании рассматривается тепловая машина. Помимо традиционных вопросов, в нем рассматриваются временные характеристики данной машины.

Рабочим телом двигателя является одноатомный идеальный газ, который находится в цилиндрическом сосуде под поршнем. В начальном состоянии параметры этого газа известны и равны: объем -  $V_0$ , давление -  $P_0$ , температура -  $T_0$ . При решении задач используются относительные единицы – отношения объема, давления и температуры к соответствующим величинам в начальном состоянии:

$$v = \frac{V}{V_0}, \quad p = \frac{P}{P_0}, \quad \tau = \frac{T}{T_0}. \quad (1)$$

Цикл тепловой машины состоит из 5 этапов, длительность каждого из них равна  $t_0$ . Эту величину можно использовать в качестве единицы времени.

Величины  $P_0, V_0, T_0, t_0$  заданы в единицах системы СИ.

В Листах ответов приведены графики зависимостей объема и температуры газа от времени. Для упрощения вашей работы значения параметров в некоторые моменты времени приведены в Таблице 1. На каждом этапе поршень движется с постоянным ускорением (которое может изменяться при переходе от одного этапа к другому).

#### Часть 1. Динамика цикла.

1.1 Используя данные Таблицы 1, рассчитайте значения давления  $p = \frac{P}{P_0}$ , в моменты времени, указанные в этой таблице.

*Приведите формулу, по которой проводится расчет давления, численные результаты расчетов занесите в последний столбец Таблицы 1.*

Так как поршень движется в цилиндрическом сосуде, то его координата пропорциональна объему газа под поршнем.

1.2 Для каждого этапа цикла запишите закон движения поршня (зависимость объема  $v = \frac{V}{V_0}$  от времени) -  $v(t)$  и зависимости давления от времени  $p(t)$ .

*Приведите формулы, по которым вы провели расчеты. Окончательные выражения с численными коэффициентами приведите в Таблице 2 листа ответов.*

1.3 На бланке в листе ответов постройте график зависимости давления газа  $p = \frac{P}{P_0}$  от времени.

1.4 Найдите максимальную мгновенную мощность двигателя  $w_{\max}$ , укажите момент времени  $t^*$ , в который достигается эта мощность. Ответы приведите в единицах системы СИ.

**Часть 2. Термодинамика цикла.**

2.1 На бланке в листе ответов постройте диаграмму цикла в координатах  $(p, v)$ .

2.2 Для каждого этапа цикла рассчитайте: изменение внутренней энергии газа  $\Delta U$ , совершенную газом работу  $A$ , количество полученной теплоты  $Q$ . Указанные величины можно выразить в относительных единицах.

*Приведите формулы для расчетов указанных величин, результаты расчетов для каждого этапа приведите в Таблице 3.*

2.3 Рассчитайте КПД цикла.

2.4 Найдите среднюю за цикл мощность, развиваемую данной тепловой машиной. Ответ приведите в единицах системы СИ.

**Задание 11-1. «Кардиограмма» тепловой машины. Листы ответов.**

Графики зависимостей объема и температуры от времени.



**Таблица 1. Значения объема и температуры.**

$\frac{t}{t_0}$	$\frac{V}{V_0}$	$\frac{T}{T_0}$	$\frac{P}{P_0}$
0,00	1,00	1,00	
0,50	1,00	1,50	
1,00	1,00	2,00	
1,50	1,25	2,81	
2,00	2,00	6,00	
2,50	2,75	8,25	
3,00	3,00	9,00	
3,50	2,75	7,56	
4,00	2,00	4,00	
4,50	1,25	1,56	
5,00	1,00	1,00	

**Часть 1. Динамика цикла.**

1.1. Формула для расчета давления

$$p = \frac{P}{P_0} =$$

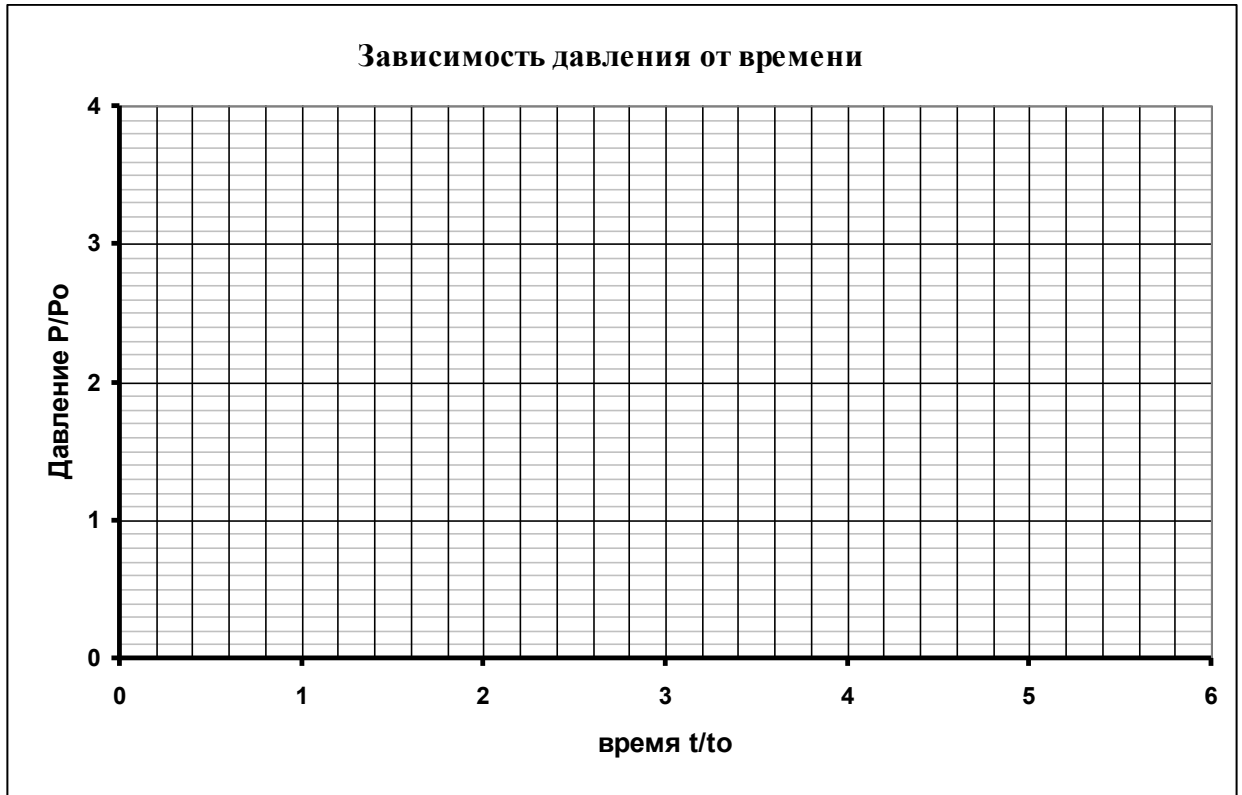
Результаты расчетов занесите в Таблицу 1.

1.2

**Таблица 2. Функции зависимостей объема и давления от времени.**

Интервал времени		$v(t)$	$p(t)$
Начало этапа $\frac{t}{t_0}$	Конец этапа $\frac{t}{t_0}$		
0	1		
1	2		
2	3		
3	4		
4	5		

1.3 График зависимости давления от времени.



1.4 Максимальная мгновенная мощность равна

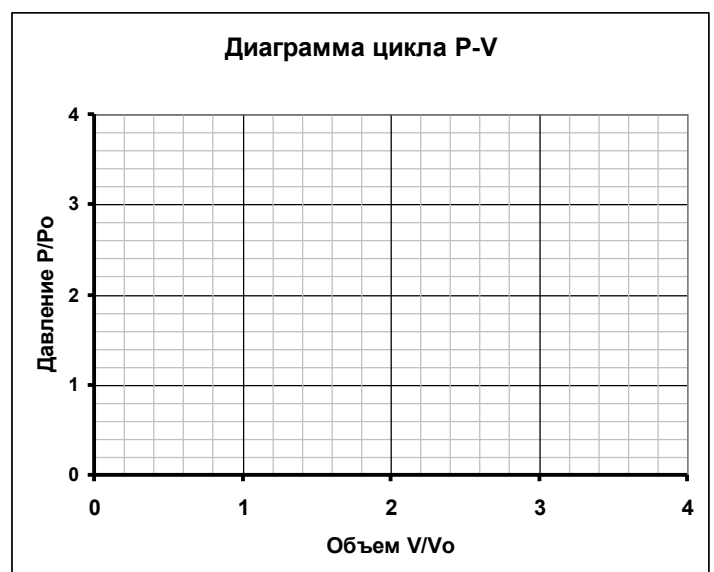
$$W_{\max} =$$

в момент времени

$$t^* =$$

**Часть 2. Термодинамика цикла.**

2.1 Диаграмма процесса в координатах  $(p, v)$ .



2.2 Термодинамические характеристики этапов цикла.

**Таблица 3. Термодинамические характеристики.**

Интервал времени		Характеристики этапов		
Начало этапа $\frac{t}{t_0}$	Конец этапа $\frac{t}{t_0}$	Изменение энергии $\Delta U$	Совершенная работа $A$	Полученная теплота $Q$
0	1			
1	2			
2	3			
3	4			
4	5			

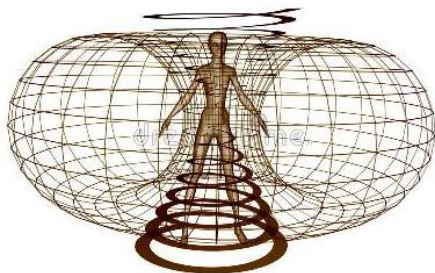
2.3 КПД цикла

$$\eta =$$

2.4 Средняя мощность за цикл

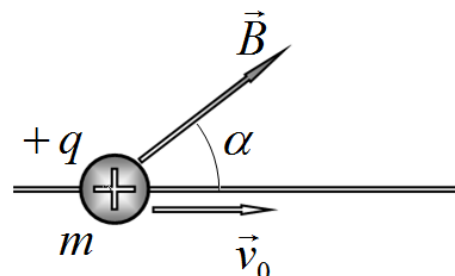
$$\langle w \rangle =$$

## Задание 11-2. Движение в поле.



### Часть 1. Прямолинейное движение в магнитном поле.

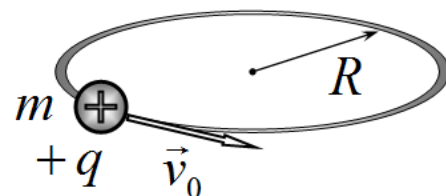
Небольшая бусинка массы  $m$  и несущая электрический заряд  $+q$  может скользить по прямолинейному стержню. Коэффициент трения бусинки о стержень равен  $\mu$ . Стержень и бусинка находятся в однородном магнитном поле, вектор индукции которого  $\vec{B}$  направлен под углом  $\alpha$  к стержню, как показано на рисунке. Бусинке толчком сообщают начальную скорость  $\vec{v}_0$ , направленную вдоль стержня как показано на рисунке. Действием силы тяжести следует пренебречь.



- 1.1 Найдите зависимость ускорения бусинки  $\vec{a}$  от ее скорости  $\vec{v}$ .
- 1.2 Нарисуйте схематический график зависимости модуля скорости бусинки от времени  $v(t)$ .
- 1.3 Рассчитайте, какой путь  $S_1$  пройдет бусинка до полной остановки.
- 1.4 Какой путь  $S_2$  пройдет бусинка, если ее начальную скорость  $\vec{v}_0$  направить в противоположном направлении?

### Часть 2. Движение по окружности в электрическом поле.

Описанная в первой части бусинка (масса -  $m$ , электрический заряд  $+q$ ) может скользить по плоскому кольцу радиуса  $R$ . Коэффициент трения бусинки о кольцо равен  $\mu$ . Силой тяжести пренебрегайте.



#### 2.1 Поля нет.

Бусинке сообщают начальную скорость  $\vec{v}_0$ , направленную по касательной к кольцу.

- 2.1.1 Покажите, что кинетическая энергия бусинки при ее последовательном смещении на некоторый угол  $\Delta\varphi$  по кольцу убывает в геометрической прогрессии.

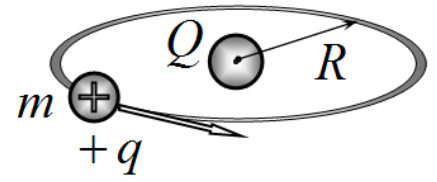
После того, как бусинка прошла один полный оборот по кольцу, ее скорость уменьшилась на 20%.

- 2.1.2 Рассчитайте, на сколько процентов уменьшится скорость бусинки после того, как она сделает 5 полных оборотов по кольцу.



## 2.2 Поле появилось.

Для уменьшения силы трения в центре кольца закрепляют точечный заряд  $Q$ .



2.2.1 Укажите, при каком знаке заряда в центре кольца  $Q$  возможно уменьшение силы трения, действующей на бусинку.

Этот заряд создает в точках кольца электрическое поле, модуль напряженности которого равен  $E_0$  (далее считайте эту величину известной). Будем считать, что это поле может уменьшить силу трения, действующую на бусинку.

2.2.2 Найдите при какой скорости  $v^*$  бусинка может скользить по кольцу с постоянной по модулю скоростью.

2.2.3 Нарисуйте на бланке листа ответов схематические графики зависимости скорости бусинки от времени при следующих начальных скоростях а)  $v_0 > v^*$ ; б)  $v_0 < v^*$ .

**Заданию 11-2. Движение в поле. Листы ответов**

**Часть 1. Прямолинейное движение в магнитном поле.**

1.1 Зависимость ускорения бусинки  $\vec{a}$  от ее скорости  $\vec{v}$

$$\vec{a} =$$

1.2 Схематический график зависимости модуля скорости бусинки от времени  $v(t)$ .



1.3 Путь до остановки

$$S_1 =$$

1.4 Путь до остановки

$$S_2 =$$

**Часть 2. Движение по окружности в электрическом поле.**

**2.1 Движение без электрического поля.**

2.1.2 Скорость уменьшится на

\_\_\_\_\_ %

**2.2 Движение в электрическом поле.**

2.2.1 Укажите знак заряда

$Q$

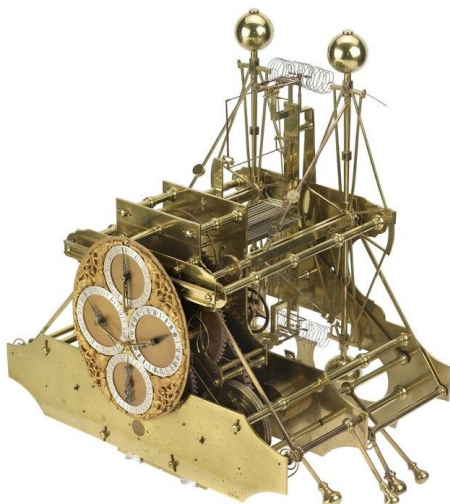
2.2.2 Значение «критической» скорости  $v^*$  бусинки

$v^* =$

2.2.3 Схематические графики зависимости скорости от времени



### Задание 11-3. Морской хронометр.



Первые попытки создать морской хронометр, работающий независимо от качки и прочих факторов, были предприняты в конце XVII века. Известны разработки Христиана Гюйгенса, Уильяма Дерема и других учёных. Но в уже упомянутом 1714 году Комиссия долгот учредила приз в 10 000 фунтов, впоследствии сумму подняли до 20 000 фунтов. Эта сумма сейчас превышает 2 миллиона фунтов стерлингов!

Преуспел в итоге английский часовщик-самоучка Джон Гаррисон. Он с братом Джеймсом были специалистами по «часовым шкафам», большим напольным часам с длинными маятниками. За разработку Гаррисон взялся в 1730 году в возрасте 37 лет, и свой первый морской хронометр продемонстрировал в 1736-м.

На фото показана точная модель хронометра Гаррисона, хранящаяся в музее Гринвичской лаборатории.

В данном задании вам необходимо проанализировать колебательную систему этого устройства. На рис. 1 показана упрощенная схема маятниковой системы, которая состоит из двух одинаковых вертикальных маятников. Каждый из них состоит из жесткого стержня длины  $l$  (массой стержня можно пренебречь), который может вращаться в вертикальной плоскости вокруг горизонтальной оси  $O$ , на противоположном конце стержня закреплен массивный шар массы  $m$  (его можно считать материальной точкой). Маятники соединены пружиной жесткости  $k$  (массой пружины также можно пренебречь), которая прикреплена к стержням на середине их длины. Пружина «работает» только на растяжение: при растяжении пружины возникает сила упругости, подчиняющаяся закону Гука; при сжатии пружины силы упругости отталкивания не возникает, пружина просто провисает. При анализе возможных режимов движения маятников удобно использовать безразмерный параметр

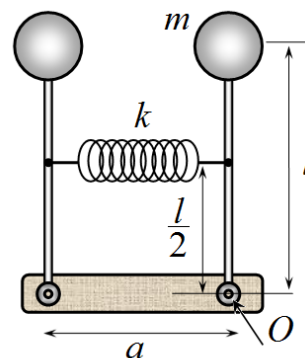


Рис. 1

$$\gamma = \frac{2mg}{kl}, \quad (1)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения. Этот параметр легко изменять, изменяя массу шаров.

Будем рассматривать случай, когда оба маятника колеблются симметрично (рис.2). Положение стержня будем характеризовать углом отклонения стержня от вертикали  $\varphi$  (рис. 3).

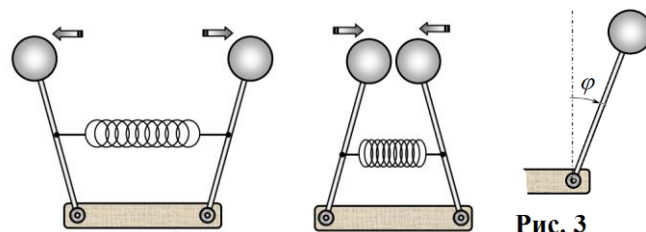


Рис. 2

Рис. 3

В первой попытке создания хронометра длина пружины в недеформированном состоянии в точности равнялась расстоянию между стержнями  $a$  в вертикальном положении (см. рис. 1).

1. Запишите зависимость потенциальной энергии системы от угла отклонения стержней  $U(\varphi)$ , полагая, что при  $\varphi = 0$   $U = 0$ . Постройте схематические графики этой зависимости при двух значениях параметра а)  $\gamma < 1$ ; б)  $\gamma > 1$ .
2. Покажите, что колебания стержней в этом случае, невозможны ни при каких значениях параметра  $\gamma$ .

Для того, чтобы стержни могли колебаться изобретатели предложили использовать удлиненную пружину. В этом случае пружина оказывается недеформированной при симметричном отклонении стержней на угол  $\varphi_0$ .

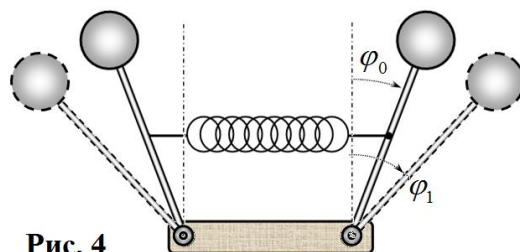


Рис. 4

3. Запишите уравнение, для определения положений равновесия стержней.
4. Найдите, при каких значениях параметра  $\gamma$ , существуют положения равновесия стержней.
5. Укажите, вблизи какого положения равновесия возможны колебания.

Пусть  $\varphi_0 = 10^\circ$ ;  $\gamma = 0,30$ .

6. Найдите значение угла  $\varphi_1$ , при котором стержни могут находиться в положении равновесия.
7. Получите формулу для периода малых колебаний стержней вблизи положения равновесия  $\varphi_1$ .
8. Чему равна максимально возможная амплитуда колебаний в этом случае.

Подсказка. Для углов меньших  $20^\circ$  можно считать, что

$$\sin \varphi \approx \varphi$$

$$\cos \varphi \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2}. \quad (2)$$

**Задание 11-3. Морской хронометр. Листы ответов**

1. Зависимость потенциальной энергии системы от угла отклонения стержней

$$U(\varphi) =$$

Схематические графики зависимости  $U(\varphi)$  при двух значениях параметра а)  $\gamma < 1$ ; б)  $\gamma > 1$ .



3. Уравнение, для определения положений равновесия стержней

4. Значения параметра  $\gamma$ , при которых существуют положения равновесия стержней

$$\gamma$$

5. Колебания возможны вблизи

6. Значение угла (формула, численное значение)

$$\varphi_1 =$$

7. Формула для периода колебаний

$$T =$$

8. Максимальная амплитуда колебаний

$$\varphi_{\max} =$$