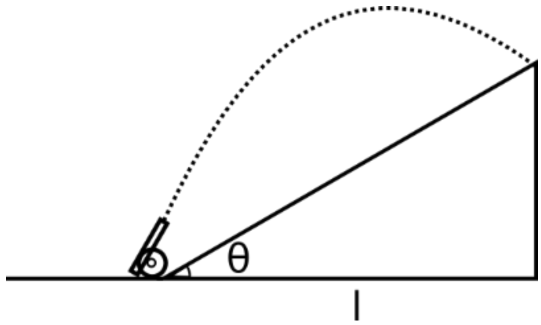
Муниципальный этап всероссийской олимпиады школьников по физике. 2021-22 учебный год. 11 класс. Максимальный балл – 50.

Задача №1



На гладкой горизонтальной поверхности покоится клин массой M = 2 кг, длиной основания l = 2 м и углом при основании $\theta = 30°$. Прямо перед клином на горизонтальной поверхности закреплена пушка, способная стрелять абсолютно неупругими пластилиновыми шариками массой m = 10 г под углом 60° к горизонту со скорострельностью 10 шариков в секунду. Пушка начинает стрелять с такой начальной скоростью, что первый шарик попадает в вершину клина, при этом клин приходит в движение. Определите среднее ускорение клина в начальный момент времени (пока смещением клина можно пренебречь).

Автор: Соболев Андрей Николаевич

Возможное решение.

Найдем начальную скорость шарика, для этого запишем уравнения его движения, имея в виду, что его траектория должна проходить через точку $(l,\ l\tan\theta)$:

$$\begin{cases} v_0 t\cos(\alpha) = l \\ v_0 t\sin(\alpha) - \dfrac{gt^2}{2} = l\,\mathrm{tg}(\theta) \end{cases}$$

Решая систему, найдем, что начальная скорость равна

$$v_0 = \sqrt{\frac{gl}{2\cos(\alpha)(\sin(\alpha)-\cos(\alpha)\,\mathrm{tg}(\theta))}} = 5.88 \text{ м/с}$$

Также заметим, что при абсолютно неупругом соударении движение клина будет происходить за счет передачи шариками клину их проекции импульса на Ox, которая у всех шариков одинакова и равна $mv_0\cos\alpha$. Таким образом, сила, действующая на клин, будет равна $F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = 0.294$ Н, а ускорение $a = \frac{F}{M} = 0.147$ м/с^2.

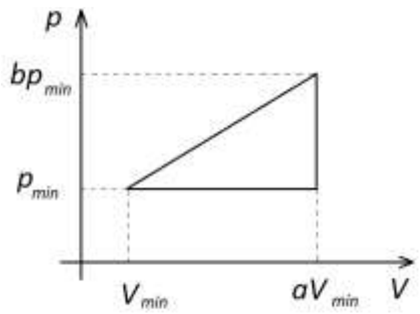
Критерии оценивания.

№	Критерий	Кол-во баллов
1	Записана система уравнений для определения начальной скорости шарика	2
2	Найдено решение системы	2
3	Получено численное значение начальной скорости шарика	1
4	Определен импульс, переданный клину одним шариком (указано, что клину передается горизонтальная проекция импульса – 1 балл; записано выражение – 1 балл)	2
5	Определена сила, действующая на клин (записан закон изменения	2

	импульса – 1 балл; корректно учтено время – 1 балл)	
6	Определено ускорение клина (правильный численный ответ)	1

Задача №2

Рабочим телом тепловой машины является $\nu = 1$ моль идеального одноатомного газа. С данным газом совершают цикл, состоящий из изохоры, изобары и процесса нагрева, в ходе которого наблюдается прямая зависимость давления от объёма. Известно, что максимальный объем в $a = 1{,}2$ раза больше минимального, максимальное давление отличается в $b = 2$ раза от минимального, а максимальная температура на $\Delta T = 280$ К больше минимальной.



Вопрос №1: Определите работу, совершаемую газом за цикл.

Вопрос №2: Определите КПД цикла.

Автор: Гусев Андрей Владиславович

Возможное решение:

В координатах p-V предложенный цикл представляет треугольник. Работа газа за цикл равна площади внутри треугольника:

$$A = \frac{1}{2}(p_{max} - p_{min})(V_{max} - V_{min}) = \frac{1}{2}(a-1)(b-1)p_{min}V_{min} = 0{,}1 \cdot p_{min}V_{min}.$$

Из уравнения Менделеева-Клапейрона: $p_{min}V_{min} = \nu RT_{min}$.

Также из уравнения Менделеева-Клапейрона следует, что: $T_{max} = abT_{min} = 2{,}4 \cdot T_{min}$.

Получаем, что: $\Delta T = T_{max} - T_{min} = 1{,}4 \cdot T_{min}$.

В результате: $T_{min} = 200$ К.

Следовательно, работа газа за цикл равна: $A = 0{,}1 \cdot \nu RT_{min} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 8{,}31 \cdot 200 = 166{,}2$ Дж**.**

Газ получает тепло от нагревателя в процессе с прямой зависимостью давления от объема:

$$Q = \Delta U + A_H = \frac{3}{2}\nu R(T_{max} - T_{min}) + \frac{1}{2}(p_{max} + p_{min})(V_{max} - V_{min}) = \frac{3}{2}\nu R\Delta T + \frac{1}{2}(b+1)(a-1)p_{min}V_{min} = \frac{3}{2}\nu R\Delta T + 0{,}3 \cdot \nu RT_{min} = 3988{,}8 \text{ Дж}.$$

КПД цикла:

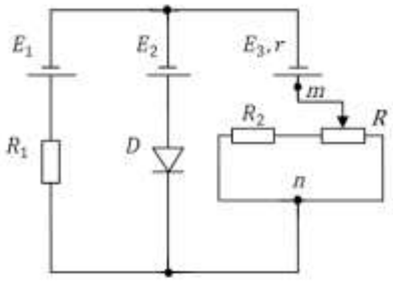
$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{166{,}2}{3988{,}8} \approx 0{,}042 = 4{,}2\%.$$

Критерии оценивания

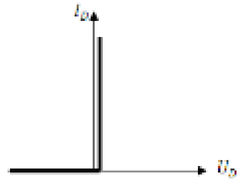
№	Критерий	Кол-во баллов
1	График в координатах p-V - треугольник	1
2	Получено выражение для работы за цикл	2
3	Из уравнения Менделеева-Клапейрона получено отношение максимальной и минимальной температур	1
4	Найдена минимальная температура	1
5	Найдена работа за цикл	1
6	Правильно определен процесс, где газ получает тепло	1
7	Определена теплота, полученная от нагревателя	2
8	Определен КПД	1

Задача №3

На рисунке представлена схема электрической цепи, состоящей из двух идеальных батарей с ЭДС $E_1 = \varepsilon,\ E_2 = 2\varepsilon$, батареи с ЭДС равной $E_3 = 3\varepsilon$ и внутренним сопротивлением $r = \frac{R}{3}$, идеального диода D, а также двух одинаковых резисторов $R_1\ =\ R_2\ = R$ и одного реостата. Максимальное сопротивление реостата также равно R. Вольт - амперная характеристика диода представлена на рисунке. Диод пропускает ток только в направлении, указанном его стрелкой.



<u>Вопрос №1</u>: Ползунок реостата делит его обмотку (полное сопротивление) на части. Пусть сопротивление левой от ползунка части реостата R_x. Получите уравнение, выражающее зависимость эквивалентного сопротивления ($R_э$) части цепи между точками m и n от R_x.



<u>Вопрос №2</u>: Может ли напряжение на диоде быть равным нулю в данной цепи?

<u>Вопрос №3</u>: Определите во сколько раз максимальная сила тока, текущего через резистор R_1 , больше чем минимальная (при всевозможных положениях ползунка реостата).

<u>Вопрос №4</u>: Определите напряжение на диоде D, при двух крайних положениях ползунка реостата.

Автор: Рыжов Петр Михайлович

Возможное решение.

<u>Вопрос №1</u>: Заметим, что ползунок реостата делит его обмотку на две части. R_x. соединено последовательно с $R_2\,(R_2 = R)$, а затем параллельно с оставшейся частью реостата. В итоге получим:

$\frac{1}{R_э} = \frac{1}{R_2+R_x} + \frac{1}{R-R_x} = \frac{1}{R+R_x} + \frac{1}{R-R_x}$. Отсюда:

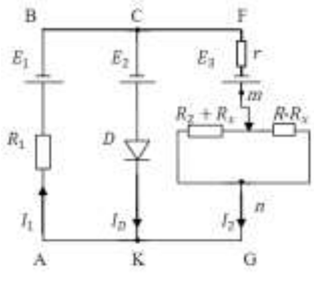
$$R_э = \frac{R^2-{R_x}^2}{2R}. \qquad (1)$$

Очевидно, что R_x может принимать все значения от минимального ($R_x = 0$) до максимального ($R_x = R$). Заметим, что выражение (1) монотонно изменяется с изменением R_x, поэтому можно найти пределы изменения $R_э$:

$$R_э^{min} = 0 \text{ и } R_э^{max} = \frac{R}{2}. \qquad (2)$$

<u>Вопрос №2</u>:

Пусть U_D – напряжение на диоде, а I_D – ток, текущий через него. Направим токи, как показано на рисунке. Применим первое правило Кирхгофа для узла K и второе правило Кирхгофа для контуров ABCK и KCFG:



$$I_1 = I_D + I_2, \qquad (3)$$

$$-\varepsilon + 2\varepsilon =\ I_1 R + U_D, \qquad (4)$$

$$-2\varepsilon + 3\varepsilon\ =\ I_2(R_э + r) - U_D, \qquad (5)$$

где $R_э$ - сопротивление участка m-n.

Предположим, что возможно равенство нулю напряжения на диоде. Тогда диод «открыт» и через него течет *положительный ток* I_D.

После решения системы (3) - (5) при $U_D = 0$ найдем:

$I_D = \frac{\varepsilon}{R} - \frac{\varepsilon}{R_э+r}$.

Заметим, что зависимость $I_D\ (R_э\ )$ – монотонная, поэтому ток изменяется в пределах

$I_D\ (R_э^{min})= \frac{\varepsilon}{R} - \frac{\varepsilon}{0+r} = - \frac{2\varepsilon}{R} < 0$

$I_D\ (R_э^{max})= \frac{\varepsilon}{R} - \frac{\varepsilon}{\frac{R}{2}+r} = -\frac{\varepsilon}{5R} < 0.$

Получили противоречие (ток через диод должен быть положительным), а это значит, что диод *всегда* «закрыт» и ток через него равен нулю. Следовательно, $U_D = 0$ - невозможно.

<u>Вопрос №3</u>: Для закрытого диода $I_D = 0$, и решение системы (3) – (5) дает:

$I_1 = \frac{2\varepsilon}{r+R+R_э}$, (6)

Заметим, что зависимость $I_1\,(R_э)$ - монотонная, поэтому максимальный и минимальный ток будет при крайних положениях движка реостата:

$I_{min}\,(R_э^{max}) = \frac{12\varepsilon}{11R}$

$I_{max}\left(R_э^{min}\right) = \frac{3\varepsilon}{2R}.$

Тогда $\frac{I_{max}}{I_{min}} = 1{,}375 \approx 1{,}37$

<u>Вопрос №4</u>: Для закрытого диода $I_D = 0$, и решение системы (3) – (5) дает:

$U_D = \varepsilon - I_1 R = \frac{\varepsilon(r-R+R_э)}{r+R+R_э}.$ (7)

При двух крайних положениях ползунка напряжения на диоде равны:

$U_{D_1} = -\frac{\varepsilon}{11}$ и $U_{D_2} = -\frac{\varepsilon}{2}.$

Критерии оценивания.

№	Критерий	Кол-во баллов
1	Получено выражение (1) для $R_э$	1
2	Найдены значения сопротивления между точками m-n при крайних положениях движка реостата $R_э^{min} = 0$ и $R_э^{max} = \frac{R}{2}$ (любым способом)	0,5 + 0,5
3	Указано, что $U_D = 0$ соответствует открытому состоянию диода	0,5
4	Уравнения (3), (4), (5) получены в общем виде или для $U_D = 0$	1+1+1
5	Правильно найдены $I_D\left(R_э^{min}\right)$и $I_D\ (R_э^{max})$	0,5+0,5
6	Сделан вывод о том, что $U_D = 0$ - невозможно и диод «закрыт»	1
7	Получена формула (6) для тока, протекающего через сопротивление R_1	0,5
8	Вычислено отношение $\frac{I_{max}}{I_{min}}$=1,37	0,5
9	Получена формула (7) для напряжения на диоде	0,5
10	Вычислены напряжения на диоде $\lvert U_{D_1}\rvert = \frac{\varepsilon}{11}$ и $\lvert U_{D_2}\rvert = \frac{\varepsilon}{2}$	0,5 + 0,5

Задача №4

В однородное электрическое поле с напряженностью E вносят металлический параллелепипед со сторонами a – b – c (a < b < c) так, что поле направлено вдоль ребра a.

Вопрос №1: Какой заряд будет индуцирован на грани b – c?

Вопрос №2: Какую работу нужно совершить, чтобы медленно повернуть параллелепипед так, чтобы поле оказалось направлено вдоль ребра b?

Вопрос №3: Сколько тепла выделится в параллелепипеде, если поле выключить?

Автор: Воронцов Александр Геннадьевич

Возможное решение и критерии оценивания.

№	Критерий	Кол-во баллов
1	В электрическом поле заряды в металлических телах распределяются так, чтобы полностью компенсировать внешнее поле.	1
2	Заряды на поверхности можно представить, как заряды конденсатора, поле которого равно E и направлено противоположно внешнему полю.	1
3	Поле внутри конденсатора: $E = q/(b*c)/\varepsilon_0$, откуда $q = bcE\ \varepsilon_0$	1
4	При медленном перемещении проводника тепловые потери можно не учитывать, поэтому искомая работа равна разности конечной и начальной энергии системы зарядов.	1
5	Энергия системы зарядов, расположенных как в плоском конденсаторе: $W = Uq/2 = (E*a)*(E*b*c\ \varepsilon_0)/2 = (E^2\ \varepsilon_0/2)*a*b*c$	1
6	Энергия зависит только от объема, поэтому она не меняется. $\Delta W=0$	2
7	При выключении поля, разделенные заряды в пластине перемешиваются. Их энергия выделятся в виде тепла.	1
8	Выделившееся тепло равно $Q = (E^2\ \varepsilon_0/2)*a*b*c$.	2

Задача №5.

Во время раскопок археологами была обнаружена работа участника муниципального этапа межпланетной олимпиады школьников по физике, датированная 29 октября 2137 года. В результате тщательного анализа документа выяснилось, что учащимся было предложено изучить зависимость времени соскальзывания бруска с наклонной плоскости без начальной скорости от угла ее наклона к горизонту.

Длина плоскости $L = 60$ см, размеры бруска малы по сравнению с размерами плоскости. Датчики контроля времени установлены в самом начале и в самом конце плоскости (измеряют время прохождения телом всей длины плоскости). Для определения угла наклона плоскости школьники измеряли разность высот H между верхним и нижним краями плоскости. Вам доступна таблица с измерениями учащихся. Пользуясь предложенными данными определите:

1) коэффициент трения бруска о наклонную плоскость;

2) на какой планете выполняли работу школьники.

H, см	**t,c**	**H, см**	**t,c**	**H, см**	**t,c**	**H, см**	**t,c**
6		16		26	20,55	36	10,69
7		17		27	18,03	37	9,69
8		18		28	17,00	38	10,14
9		19	Не скользит	29	15,81	39	9,43
10	Не скользит	20		30	14,15	40	8,68
11		21		31	13,96	41	8,78
12		22		32	12,44	42	8,53
13		23	47,54	33	12,53	43	8,05
14		24	31,87	34	11,05	44	8,00
15		25	25,05	35	10,80	45	8,04

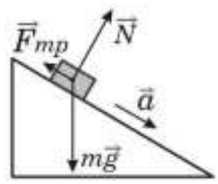
Справочная информация:

Ускорение свободного падения на поверхности некоторых небесных тел, м/с^2 и g

Земля	9,81 м/с^2	1,00 g	Солнце	273,1 м/с^2	27,85 g
Луна	1,62 м/с^2	0,165 g	Меркурий	3,70 м/с^2	0,378 g
Венера	8,88 м/с^2	0,906 g	Марс	3,86 м/с^2	0,394 g
Юпитер	24,79 м/с^2	2,528 g	Сатурн	10,44 м/с^2	1,065 g
Уран	8,86 м/с^2	0,903 g	Нептун	11,09 м/с^2	1,131 g
Эрида	0,82 м/с^2	0,084 g	Плутон	0,617 м/с^2	0,063 g

Автор: Карманов Максим Леонидович

Возможное решение.



1. Рассмотрим силы, действующие на брусок в процессе его соскальзывания, и запишем для бруска второй закон Ньютона в проекциях на оси: x – направленную вниз вдоль наклонной плоскости; y – направленную вверх, перпендикулярно оси x. Обозначим угол наклона плоскости к горизонту α.

$ma = mg\,sin(\alpha) - F_{\text{тр}}$

$0 = N - mg\,cos(\alpha)$

Учитывая, что брусок скользит, можем записать $F_{\text{тр}} = \mu N$.

Выразим из этих уравнений ускорение $a = g\,(\sin(\alpha) - \mu\cos(\alpha))$. Из полученной зависимости можно сделать два вывода:

- ускорение пропорционально величине $\sin(\alpha) - \mu\cos(\alpha)$ и коэффициент пропорциональности равен ускорению свободного падения;
- соскальзывание возможно только, если $\sin(\alpha) > \mu\cos(\alpha)$, что эквивалентно $\mu < tg(\alpha)$.

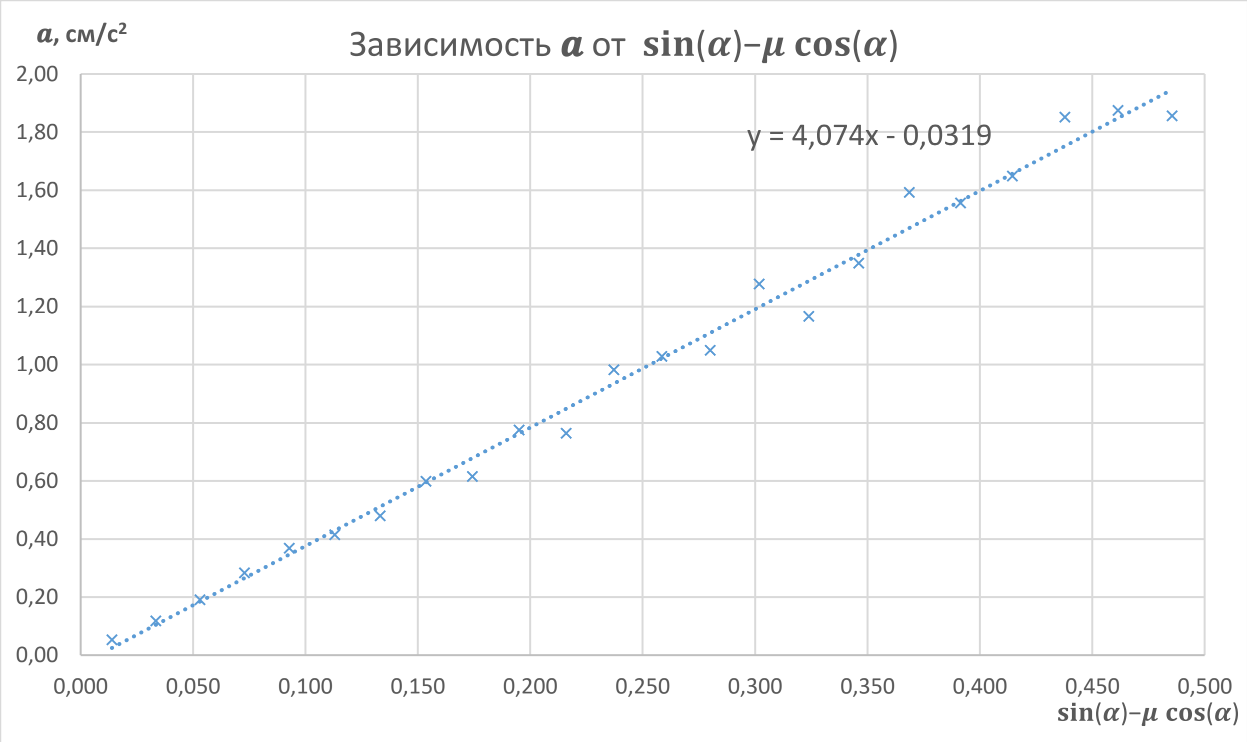
Воспользуемся вторым выводом. Из таблицы измерений следует, что тело начинает соскальзывать с наклонной плоскости при высотах наклонной плоскости от 22 до 23 см. Найдем при каком коэффициенте терния будут выполнены эти условия $\sin(\alpha) = \frac{H}{L}$, $\mu = tg(\alpha) = tg(\arcsin\left(\frac{H}{L}\right))$

$\mu_1 = tg\left(\arcsin\left(\frac{22}{60}\right)\right) = 0{,}394$ $\mu_2 = tg\left(\arcsin\left(\frac{23}{60}\right)\right) = 0{,}415$. Откуда получаем $\mu = 0{,}40 \pm 0{,}02$

Зная коэффициент трения построим график зависимости ускорения от $(\sin(\alpha) - \mu\cos(\alpha))$. Если теория верна, то графиком данной зависимости будет прямая с угловым коэффициентом наклона, равным g. Рассчитаем для каждого опыта ускорение $a = 2L/t^2$ и величину $\sin(\alpha) - \mu\cos(\alpha)$.

H, см	**t, с**	$\boldsymbol{a}$, см/с^2	$\boldsymbol{\sin(\alpha) - \mu\cos(\alpha)}$
23	47,54	0,05	0,014
24	31,87	0,12	0,033
25	25,05	0,19	0,053
26	20,55	0,28	0,073
27	18,03	0,37	0,093
28	17,00	0,42	0,113
29	15,81	0,48	0,133
30	14,15	0,60	0,154
31	13,96	0,62	0,174
32	12,44	0,78	0,195
33	12,53	0,76	0,216
34	11,05	0,98	0,237
35	10,80	1,03	0,258
36	10,69	1,05	0,280
37	9,69	1,28	0,302
38	10,14	1,17	0,324
39	9,43	1,35	0,346
40	8,68	1,59	0,369
41	8,78	1,56	0,391
42	8,53	1,65	0,414
43	8,05	1,85	0,438
44	8,00	1,88	0,461
45	8,04	1,86	0,485

Построим график



Из графика определим угловой коэффициент наклона прямой. Значение коэффициента численно равно ускорению свободного падения $g = 4{,}1$ м/с^2. Исходя из таблицы в условии можно сделать вывод, что работа скорее всего выполнялась на Марсе.

Критерии оценивания.

№	Критерий	Баллы
1	Записан второй закон Ньютона для бруска в проекциях на оси	1+1
2	Получена связь коэффициента трения с критическим углом	1
3	Вычислено значение коэффициента трения	1
4	Выведена связь ускорения с углом наклона плоскости	1
5	Выведена связь ускорения с временем движения	0,5
6	Построен линеаризованный график или выполнен пересчет g для каждого опыта	2,5
7	Получено значение ускорения свободного падения	1
8	Сделан вывод о планете (Марс или Меркурий)	1