

брусек массы m находится на наклонной плоскости...

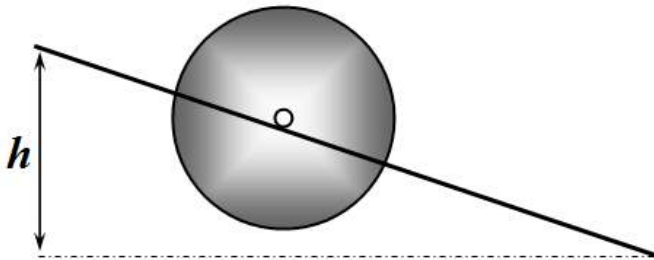
Условие

Приборы и материалы: два штатива, диск на палочке, нитки, секундомер, линейка.



Вам предстоит выполнить достаточно традиционное задание – исследовать движение тела, движущегося по наклонной плоскости. Правда, в данном задании есть несколько отличий от традиционного «брусек массы m находится на наклонной плоскости...»: - задание экспериментальное, а не теоретическое; - в вашем распоряжении не брусок, а диск на палочке от шашлыка; - он не скользит, а скатывается; - и не по наклонной плоскости, а по нитям-направляющим; - надо учитывать не только трение, но и сопротивление воздуха (который не удалось откачать из рабочего кабинета); - скорость движения несколько меньше, чем у изображенного на заставке горнолыжника, а в остальном – все традиционно.

Следите, чтобы нити были все время натянуты. Вы самостоятельно можете изменять разность уровней крепления нитей h (не забудьте измерять и записывать эту величину). Длину нитей оставляйте неизменной. На нитки нанесены равноотстоящие метки, используйте их в качестве шкалы.



При измерениях используйте секундомер с запоминанием промежуточных этапов. При необходимости сначала (до первой метки) диск можно немного подтолкнуть. **При необходимости, обращайтесь к членам жюри за консультацией.**

Часть 1.

Установите разность уровней крепления нитей $h = 15$ см.

1.1 Экспериментально исследуйте закон движения оси диска – зависимость его координаты от времени. Кратко опишите, как вы проводили измерения. 1.2 Постройте график полученной зависимости. 1.3 Укажите, можно ли считать движение диска равномерным. Ответ обоснуйте. 1.4 Считая движение диска равноускоренным, получите теоретический вид зависимости средней скорости (от прохождения первой метки) от времени движения (от первой метки). На основании своих экспериментальных данных построьте график зависимости средней скорости (от прохождения первой метки) от времени. Укажите, свидетельствует ли полученный график о том, что движение является равноускоренным. 1.5 Считая движение диска равноускоренным, получите теоретический вид зависимости средней скорости прохождения расстояния между двумя последовательными метками от времени движения. На основании своих экспериментальных данных постройте график

зависимости этой средней скорости от времени движения. Укажите, свидетельствует ли полученный график о том, что движение является равноускоренным. 1.6 Выделите интервал пути, пройденного диском, на котором вы можете считать движение равноускоренным. Обоснуйте выбор этого интервала. В дальнейшем для расчета ускорений используйте именно этот временной интервал. Также используйте только один способ измерения (и обработки) ускорения, по вашему выбору – выбор обоснуйте.

Часть 2.

2.1 Измерьте зависимость ускорения диска от разности уровней крепления нитей h . (обязательно укажите как вы измеряли ускорения). 2.2 Постройте график полученной зависимости.

2.3 Предложите простую формулу, описывающую данную зависимость, найдите ее параметры. Обоснуйте выбор вашей формулы.

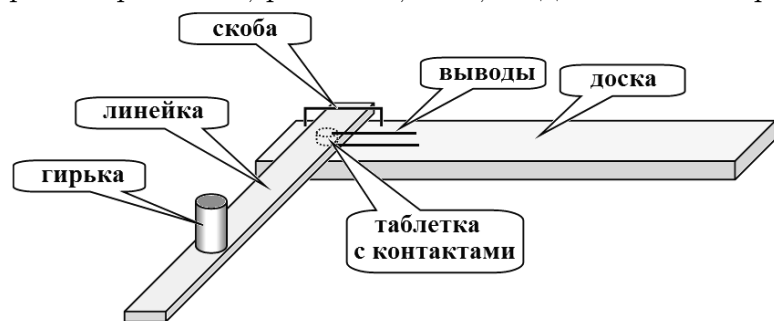
Задание 9.1 Электронные весы.



Оказывается, что сопротивление таблетки активированного угля зависит от приложенной к ней механической нагрузки. Поэтому такая таблетка может послужить основным элементом электронных весов. Однако к конструированию таких весов следует подходить с научной, то есть физической точки зрения. Для этого необходимо тщательно изучить ее физические свойства, а затем заняться конструкторской разработкой. **Ускорение свободного падения считайте равным**

$$g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

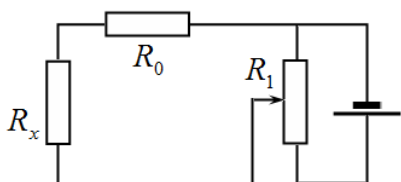
Приборы и оборудование:** таблетка, гири из набора 100 и 50 г, линейка деревянная 40 см, доска деревянная со скобой и углублением для таблетки, источник тока ЛИП, мультиметр, резистор 100 Ом, реостат 6,0 Ом, соединительные провода, электрические контакты.



Для выполнения работы используется следующая установка. Угольная таблетка помещается между двумя контактами (проводящие пластинки) в специальную выемку в массивной доске, к контактам подключены проволочные выводы, к которым можно подключать измерительные электрические схемы. Для создания давления на таблетку используется деревянная линейка, конец которой удерживается с помощью скобы (для удобства измерений совмещайте нуль шкалы линейки со скобой), на линейку в произвольном месте можно класть гирю.

1.1 Измерьте массу линейки. Оцените погрешность вашего измерения. Считайте, что относительная приборная погрешность массы гирь равна 4%

1.2 Измерьте зависимость силы тока через таблетку, когда к ней приложена сила давления F , от напряжения на ней. Измерения проведите для двух значений силы давления $F = 5 \text{ Н}$ и $F = 10 \text{ Н}$. Укажите, какие гирьки вы использовали для создания нужной силы давления и где вы их располагали. Для электрических измерений рекомендуем использовать следующую схему, на которой: R_x - изучаемый элемент (таблетка), R_0 - известное постоянное сопротивление (100 Ом), R_1 - реостат. **Мультиметр используйте только для измерения напряжения**.** Учтите, что напряжение источника может изменяться.



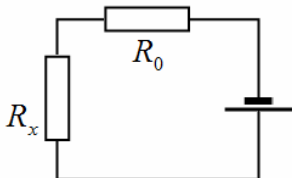
Укажите, какие напряжения вы измеряли, приведите расчетные формулы, которые вы использовали. 1.3 Постройте графики полученных зависимостей. Можно ли считать, что для таблетки выполняется закон Ома?

1.4 Рассчитайте электрическое сопротивление таблетки при использованных значениях силы давления. Приборная погрешность сопротивления резистора равна 5%.

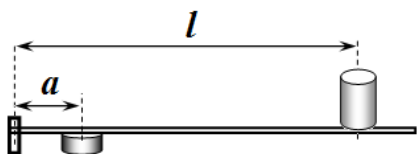
В дальнейших пунктах погрешности оценивать не требуется.

Часть 2. Зависимость сопротивления таблетки от нагрузки.

В данной части вам необходимо исследовать зависимость сопротивления таблетки от приложенной силы давления. Измерения следует проводить при большом напряжении на таблетке, поэтому в данной части реостат является излишним рекомендуем проводить измерения с помощью следующей схемы (еще одним достоинством этой схемы является малый потребляемый ток).



Укажите, какие напряжения вы измеряли, приведите расчетные формулы, которые вы использовали. Для изменения силы давления на таблетку рекомендуем передвигать гирьку по линейке. Для упрощения и ускорения расчетов рекомендуем располагать ее на расстояниях l , кратным расстоянию a от скобы до центра таблетки (т.е. $l = na$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$).



Приведите формулу, по которой вы будете рассчитывать силу давления на таблетку.

2.1 Измерьте зависимость сопротивления таблетки положения гирьки l . Измерения проведите для гирьки массой $m = 100 \text{ г}$ в «двух направлениях»: сначала при нагрузке (постепенно увеличивая расстояние l), а затем при разгрузке (постепенно уменьшая расстояние l).

Постройте графики зависимости сопротивления таблетки от приложенной к ней силы (при

нагрузке и при разгрузке).

Можно ли считать, что полученные зависимости совпадают (т.е. можно ли пренебречь гистерезисом при деформации таблетки)?

2.2 Проведите измерения зависимости сопротивления таблетки от положения гирьки l для гирьки массы $m = 50$ г (достаточно в одном направлении). На том же бланке (на котором вы построили графики в п. 2.1) постройте график полученной зависимости.

Можно ли считать, что полученные данные согласуются друг с другом?

2.3 Используя полученные в п. 2.1 и 2.2 данные (из п.2.1 используйте средние значения сопротивления), постройте график зависимости проводимости таблетки от приложенной к ней силы давления.

Проводимостью называется величина, обратная электрическому сопротивлению $G = \frac{1}{R}$. Единица проводимости называется Сименс ($\text{См} = \text{Ом}^{-1}$), в данной задаче удобно использовать ее тысячную долю миллиСименс (мСм). Если сопротивление измерять в килоОмах, то обратная величина будет измерена в мСм.

2.4 С помощью полученного графика предложите простую формулу (она может быть приближенной), описывающую полученную зависимость проводимости от силы давления на таблетку. Определите численные значения параметров этой формулы.

Часть 3. Конструирование весов.

Весы должны быть просты в использовании, доступны любому продавцу на любом базаре. Показания ваших электронных весов (то есть напряжение на каком-либо элементе) должны линейно зависеть от массы положенного на них груза.

3.1 Предложите такую электрическую схему измерений, чтобы измеряемое напряжение линейно зависело от массы груза, положенного на линейку (или подвешенного к ней).

Получите формулы для расчета коэффициентов этой линейной зависимости.

3.2 Подберите такие значения параметров вашей установки, что бы формула для расчета зависимости напряжения (в милливольтках) от массы груза (в граммах) имела простейший вид

$$U = m_0 + m,$$

где m_0 - некоторая постоянная величина («масса тары»). Рассчитайте численное значение этой величины.

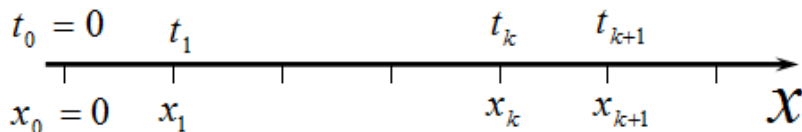
3.3 Проверьте экспериментально вашу конструкторскую разработку. Укажите значения всех параметров вашей установки, приведите значения измеренных напряжений для обоих имеющих у вас гирь.

Решение

Задание 9.1 Скатывание по склону.

Часть 1.

Для экспериментального изучения закона движения удобно засекают времена t_k , когда ось диск проходит отметку координаты x_k .



Результаты измерений времен прохождения отметок представлены в таблице 1 (для разности уровней $h = 130$ мм). На графике 1 показан закон движения оси диска.

****Таблица 1. Изучение закона движения для $h = 130$ мм.****

k	$x_k, \text{ мм}$	$t_k, \text{ с}$	$\langle v \rangle_k, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$t_{\text{ср.}}, \text{ с}$	$v_k, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$
0	0				
1	50	3,41	14,66		
2	100	6,05	16,53	4,73	18,94
3	150	8,29	18,09	7,17	22,32
4	200	10,33	19,36	9,31	24,51
5	250	12,14	20,59	11,24	27,62
6	300	13,84	21,68	12,99	29,41
7	350	15,40	22,73	14,62	32,05
8	400	16,98	23,56	16,19	31,65
9	450	18,50	24,32	17,74	32,89
10	500	20,02	24,98	19,26	32,89

График не является прямой линией, поэтому движение не может считаться равномерным.

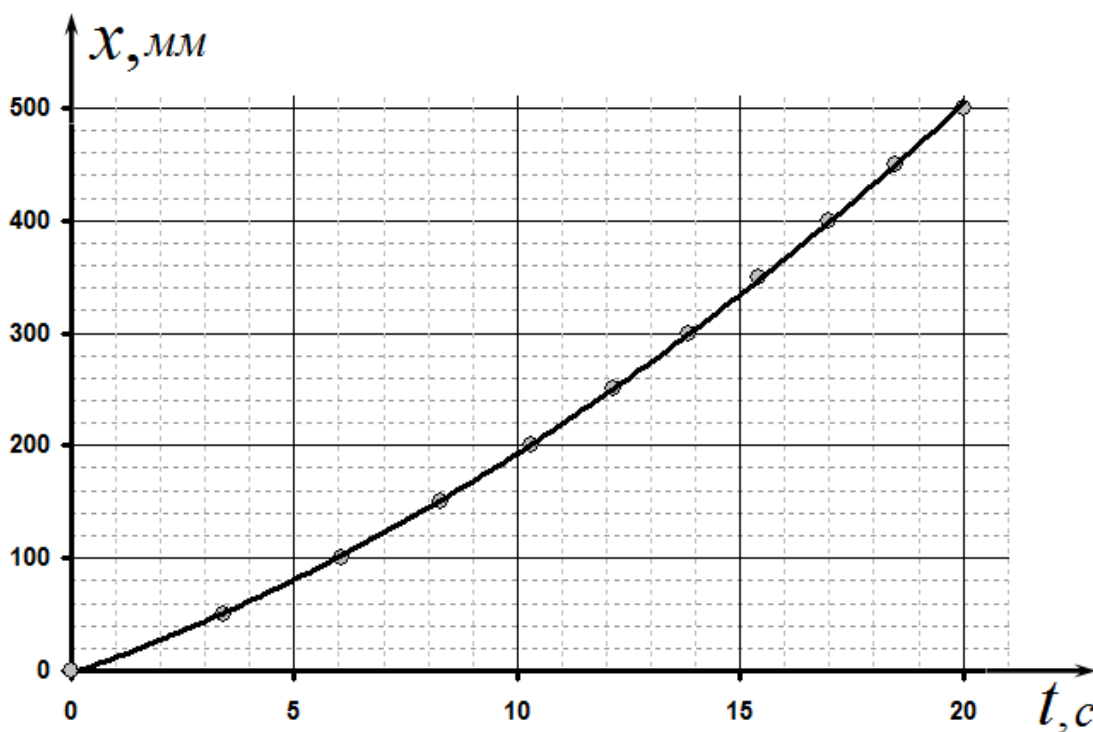


График 1. Закон движения

Построим график зависимости средней скорости от времени. Причем среднюю скорость рассчитываем на интервале $[x_0, x_k]$ по формуле (результаты расчетов представлены в таблице 1):

$$\langle v \rangle_k = \frac{x_k}{t_k}. \quad (1)$$

При равноускоренном движении, проходящем по закону

$$x = v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad (2)$$

данная средняя скорость должна линейно зависеть от времени

$$\langle v \rangle = \frac{x}{t} = v_0 + \frac{at}{2}, \quad (3)$$

График показывает, что, строго говоря, движение не является равноускоренным, так как полученная зависимость не является линейной. На данном же графике видно, что со временем средняя скорость возрастает медленнее, чем по линейному закону – сказывается влияние силы сопротивления воздуха.

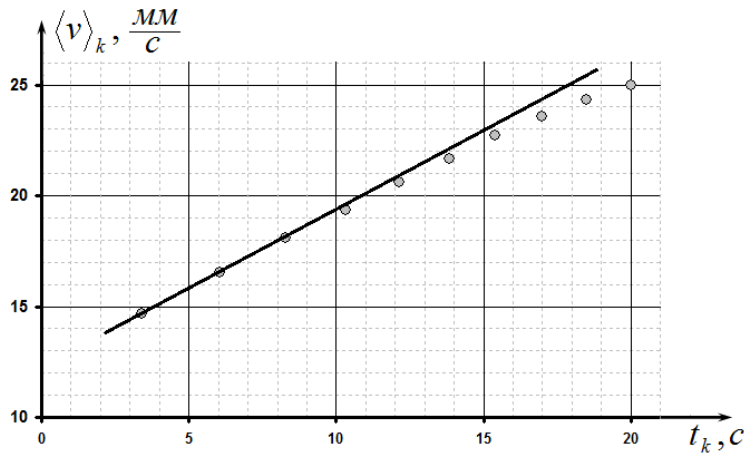


График 2. Зависимость средней скорости от времени

Несколько лучший результат (в смысле приближенности к равноускоренному движению) получается, если времена и координаты отсчитывать от первой (а не нулевой отметки) – в этом случае участок, который можно приближенно отнести к равноускоренному движению больше (6 начальных точек хорошо ложатся на прямую линию).

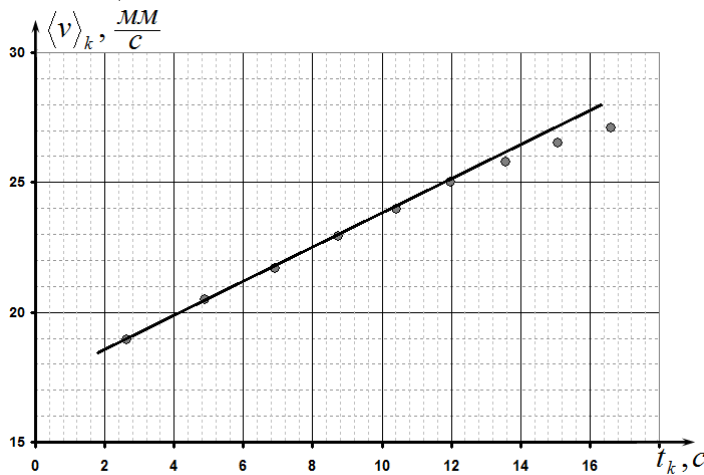


График 2*. Зависимость средней скорости от времени (со сдвигом)

Получим формулу для расчета средней скорости на интервале пути. Для этого запишем выражения для пройденных путей при равноускоренном движении

$$\begin{aligned} x_{k-1} &= v_0 t_{k-1} + \frac{a t_{k-1}^2}{2} \\ x_k &= v_0 t_k + \frac{a t_k^2}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

И вычтем первое равенство из второго:

$$x_k - x_{k-1} = v_0 (t_k - t_{k-1}) + \frac{a (t_k^2 - t_{k-1}^2)}{2}. \quad (5)$$

Из этой формулы следует выражение для средней скорости на интервале пути

$$v_{cp.k} = \frac{x_k - x_{k-1}}{(t_k - t_{k-1})} = v_0 + a \frac{(t_k + t_{k-1})}{2}. \quad (6)$$

Из этого выражения следует, что данную среднюю скорость необходимо рассматривать в зависимости от среднего арифметического времен прохождения концов интервала. Результаты расчетов также приведены в таблице 1. График зависимости показан на рис. 3. На этой зависимости участок равноускоренного движения выражен более четко, однако разброс точек более заметен, что связано с большими погрешностями при расчете разностей времен.

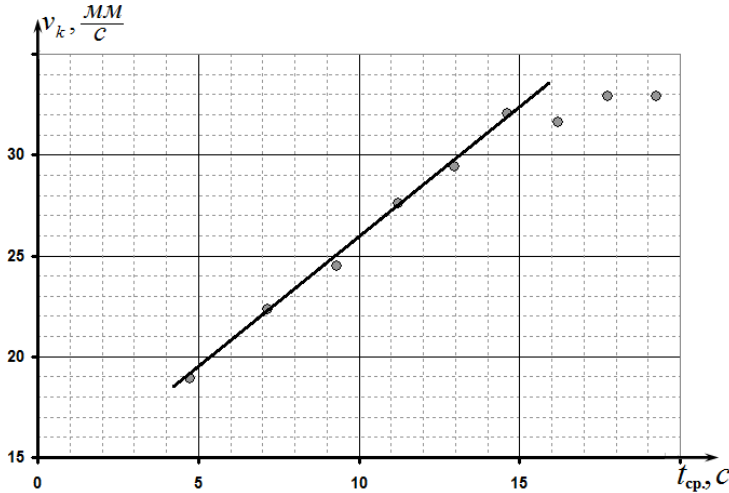


График 3. Зависимость средней на интервале скорости от времени

Интересно отметить, что расчет ускорения по зависимости 3 дает значение $a = (1,3 \pm 0,1) \frac{мм}{с^2}$, по графику $2^ a = (1,3 \pm 0,4) \frac{мм}{с^2}$.

Тем самым приходим к выводу, что оптимальным способом расчета ускорения является изучение зависимости средней интервальной скорости от времени. Т.е. по изучению зависимости (6).

Часть 2.

Результаты времен прохождения отметок приведены в Таблицах 2 -3, там же приведены результаты расчетов ускорений (по наклону графика) для различных разностей высот крепления нитей. Графики полученных зависимостей показаны на рис. 4

Отметим, что на основании подробного анализа результатов для $h = 130$ мм достаточно было для каждой разности высот снять показания для 4 точек. Также допустимо рассчитывать ускорения алгебраически «по трем точкам» по формуле, которая следует из формулы (6):

$$a = 2 \frac{v_{cp.3} - v_{cp.2}}{t_3 - t_1}. \quad (7)$$

*Расчеты дают близкие результаты, но их точность ниже.

Для получения вполне приличного результата достаточно провести измерения для трех углов наклона.*

Таблица 2. Измерения ускорений.

k	$x_k, \text{ мм}$	$t_k, \text{ с}$	$t_{\text{ср.}}, \text{ с}$	$v_k, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$t_k, \text{ с}$	$t_{\text{ср.}}, \text{ с}$	$v_k, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$t_k, \text{ с}$	$t_{\text{ср.}}, \text{ с}$	$v_k, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$
0	0	0			0			0		
1	50	5,96			5,29			4,63		
2	100	11,23	8,60	9,49	9,36	7,33	12,29	7,82	6,23	15,67
3	150	16,29	13,76	9,88	12,93	11,15	14,01	10,55	9,19	18,32
4	200	21,15	18,72	10,29	16,32	14,63	14,75	13,08	11,82	19,76
5	250	25,87	23,51	10,59	19,39	17,86	16,29	15,18	14,13	23,81
6	300	30,93	28,40	9,88	22,45	20,92	16,34	17,3	16,24	23,58
7	350	35,66	33,30	10,57	25,28	23,87	17,67	19,21	18,26	26,18
8	400	40,90	38,28	9,54	27,99	26,64	18,45	21,12	20,17	26,18
9	450	46,77	43,84	8,52	30,76	29,38	18,05	22,94	22,03	27,47
10	500	53,57	50,17	7,35	33,57	32,17	17,79	24,77	23,86	27,32
$a \frac{\text{мм}}{\text{с}^2}$	0,08			0,36			0,87			

Таблица 2. Измерения ускорений.

k	**$x_k, \text{ мм}$**	**$h = 130 \text{ мм}$**			**$h = 165 \text{ мм}$**		
		$t_k, \text{ с}$	$t_{\text{ср.}}, \text{ с}$	$v_k, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$	$t_k, \text{ с}$	$t_{\text{ср.}}, \text{ с}$	$v_k, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$
0	0	0			0		
1	50	3,41			2,79		
2	100	6,05	4,73	18,94	5,03	3,91	22,32
3	150	8,29	7,17	22,32	6,84	5,94	27,62
4	200	10,33	9,31	24,51	8,54	7,69	29,41
5	250	12,14	11,24	27,62	10	9,27	34,25
6	300	13,84	12,99	29,41	11,43	10,72	34,97
7	350	15,4	14,62	32,05	12,71	12,07	39,06
8	400	16,98	16,19	31,65	14,03	13,37	37,88
9	450	18,5	17,74	32,89	15,26	14,65	40,65
10	500	20,02	19,26	32,89	16,49	15,88	40,65
$a \frac{\text{мм}}{\text{с}^2}$	1,30			1,95			

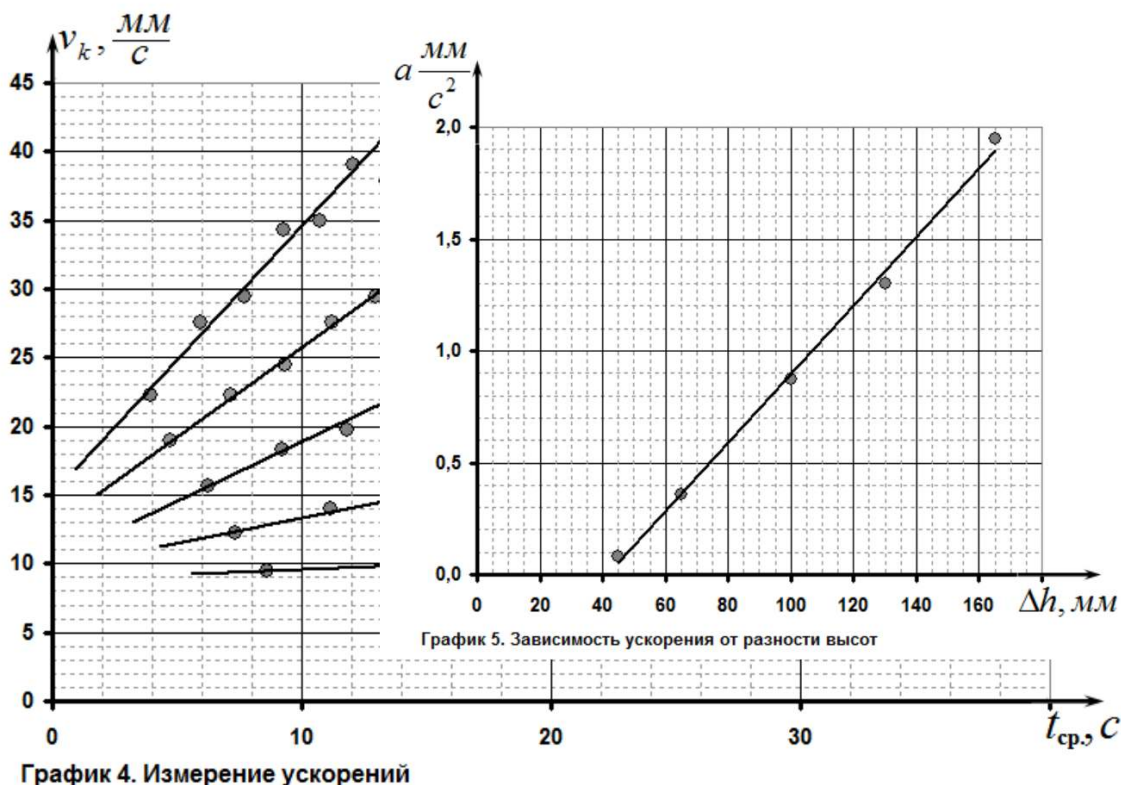


График 4. Измерение ускорений График 5. Зависимость ускорения от разности высот График зависимости ускорения от разности высот точек крепления показан на рис. 5. Как и в случае поступательного движения тела по наклонной плоскости, ускорение пропорционально синусу угла наклона, поэтому зависимость ускорения от разности высот линейная. Наличие постоянной составляющей может быть объяснено присутствием почти постоянной силы трения качения, которая в данном случае может быть заметна из-за неизбежного прогиба нитей. Аналитически данная зависимость описывается формулой

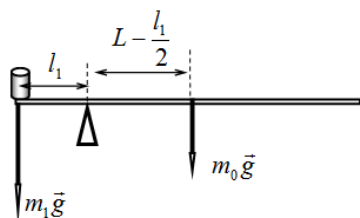
$$a = Ch + b. \quad (8)$$

где $C = 0,015 c^{-2}$, $b = -0,64 m \cdot c^{-2}$.

В заключение укажем, что теоретическое значение ускорения оси диска описывается формулой

$$a = 2g \left(\frac{r}{R} \right)^2 \frac{\Delta h}{L},$$

где R, r - радиусы диска и его оси, соответственно, L - длина нитей. В нашей установке теоретическое значение параметра $C = 2 \cdot 10^4 \frac{MM}{C^2} \left(\frac{2,8}{120} \right)^2 \frac{1}{10^3 MM} \approx 0,011 c^{-2}$, что близко к найденному значению.



Часть 1. Изучение вольтамперной характеристики таблетки.

1.1 Для измерения массы линейки можно использовать правило рычага. Для этого на конец линейки следует поместить гирьку массой $m_1 = 50$ г и уравновесить линейку на упоре (в качестве которого можно использовать край стола). Условие равновесия линейки с гирькой имеет вид

$$m_1 l_1 = m_0 \left(L - \frac{l_1}{2} \right), \quad (1)$$

где l_1 - расстояния от центра гирьки до упора, L , m_0 - длина и масса линейки. Из уравнения (1) следует, что масса линейки рассчитывается по формуле

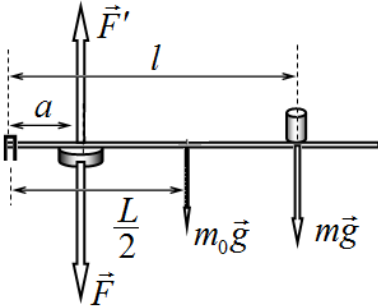
$$m_0 = m_1 \frac{l_1}{L - \frac{l_1}{2}}. \quad (2)$$

По результатам измерений: $L = (40,8 \pm 0,2)$ см, $l_1 = (4,6 \pm 0,3)$ см, $m_1 = (50 \pm 2)$ г. По этим данным масса линейки равна

$$m_1 = (14 \pm 2) \text{ г}. \quad (3)$$

Погрешность определена по методу границ.

1.2 Рассчитаем на каком расстоянии следует расположить гирьку массы m , чтобы на таблетку со стороны линейки действовала сила давления F . Здесь и далее будем использовать следующие обозначения:

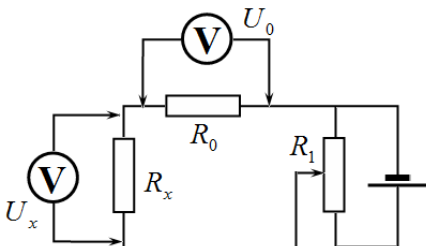


a - расстояние от скобы до центра таблетки; l - расстояние от скобы до центра гирьки. По третьему закону Ньютона на линейку со стороны таблетки действует сила F' равная по модулю силе давления на таблетку F . Поэтому условие равновесия линейки имеет вид

$$Fa = m_0 g \frac{L}{2} + mgl. \quad (4)$$

Откуда следует, что место гирьки можно рассчитать по формуле

$$l = \frac{Fa - m_0 g \frac{L}{2}}{mg}. \quad (5)$$



Для измерений необходимо использовать гирьку массой $m = 100$ г. Для создания нагрузки $F = 5$ Н гирька должна располагаться на расстоянии $l = 15$ см, а для нагрузки $F = 10$ Н на расстоянии $l = 35$ см. Для измерения вольтамперной характеристики следует измерить: напряжение U_0 на резисторе с известным сопротивлением $R_0 = 100$ Ом и напряжение U_x на таблетке. Сила тока рассчитывается по формуле

$$I = \frac{U_0}{R_0}. \quad (6)$$

Результаты измерений, а также результаты расчетов силы тока приведены в Таблицах 1 и 2 (для различных сил давления).

Таблица 1. $F = 5$ Н.

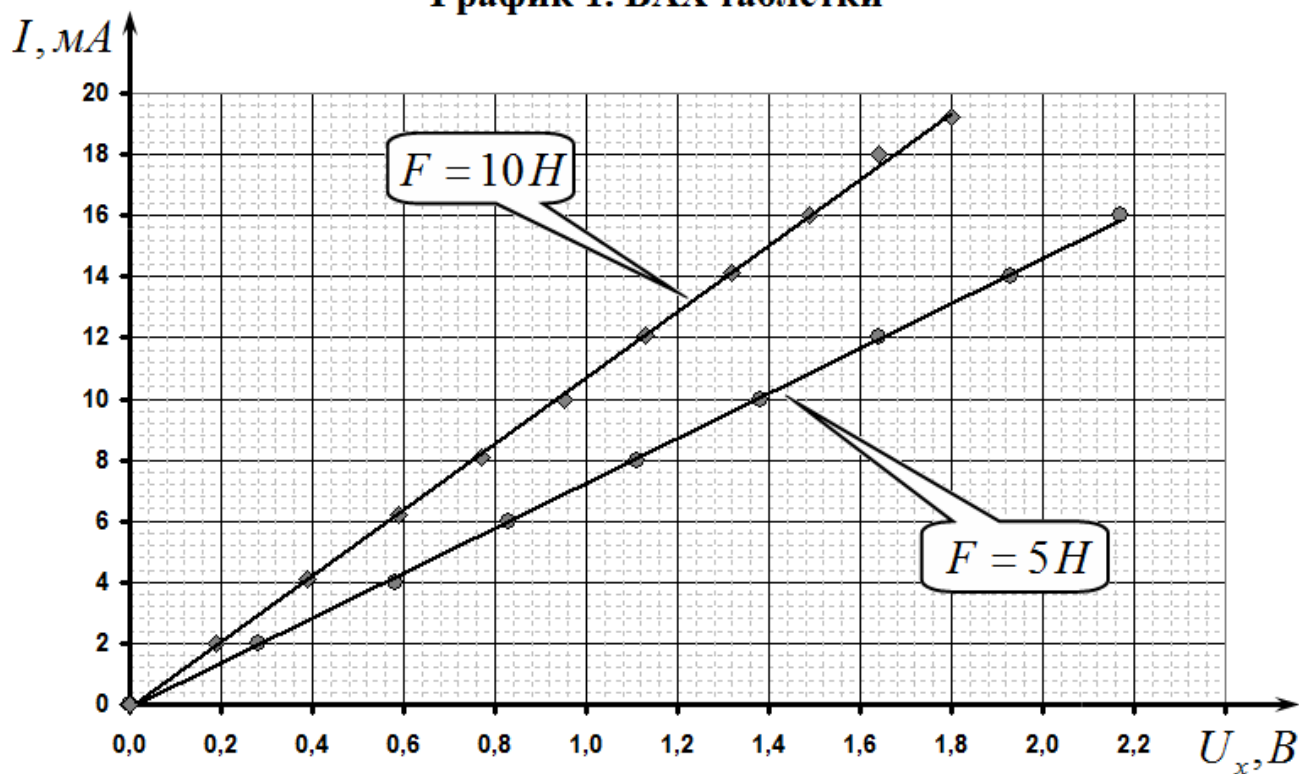
U_0 , В	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60
U_x , В	0,00	0,28	0,58	0,83	1,11	1,38	1,64	1,93	2,17
I , мА	0,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0

Таблица 2. $F = 10$ Н.

U_0 , В	0,00	0,20	0,41	0,62	0,81	1,00	1,21	1,41	1,60	1,80	1,92
U_x , В	0,00	0,19	0,39	0,59	0,77	0,95	1,13	1,32	1,49	1,64	1,80
I , мА	0,0	2,0	4,1	6,2	8,1	10,0	12,1	14,1	16,0	18,0	19,2

Графики полученных зависимостей показаны ниже.

График 1. ВАХ таблетки



Графики показывают, что с высокой точностью сила тока пропорциональна напряжению, то есть закон Ома выполняется.

Сопротивления таблетки при разных нагрузках следует определять по наклону графиков

$$R_x = \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (7)$$

Понятно, что основную погрешность в определении сопротивления вносит приборная погрешность известного сопротивления, поэтому относительная погрешность измеренных сопротивлений также будет равна 5%.

Из построенных графиков находим:

при нагрузке $F = 5 \text{ Н}$ $R_x = (137 \pm 7) \text{ Ом}$;

при нагрузке $F = 10 \text{ Н}$ $R_x = (94 \pm 5) \text{ Ом}$.

Часть 2. Зависимость сопротивления таблетки от нагрузки.

Для расчета силы давления на таблетку можно воспользоваться уравнением (4), из которого следует расчетная формула

$$F = m_0 g \frac{L}{2a} + mg \frac{l}{a}. \quad (7)$$

Если воспользоваться «подсказкой» ($l = na$, $n = 0,1,2,3...$) и подставить численные значения, то получится формула для расчета «в уме»: для груза массы 100 г: $F = (0,9 + n) \text{ Н}$; для груза массы 50 г: $F = (0,9 + 0,5n) \text{ Н}$. Для измерения сопротивления по-прежнему необходимо измерять напряжения на резисторе и на таблетке. Формула для расчета сопротивления таблетки очевидна:

$$R_x = R_0 \frac{U_x}{U_0}. \quad (8)$$

Таблица 3. Зависимость сопротивления от нагрузки ($m = 100 \text{ г}$)

среднее									
** l , см**	** F , Н**	** U_r , В**	** U_x , В**	** R , Ом**	** U_r , В**	** U_x , В**	** R , Ом**	** $\langle R \rangle$, Ом**	** G , мСм**
3,5	1,90	1,59	3,09	194,3	1,63	3,05	187,1	190,7	5,24
7,0	2,90	1,82	2,86	157,1	1,87	2,81	150,3	153,7	6,51
10,5	3,90	2,00	2,68	134,0	2,00	2,68	134,0	134,0	7,46
14,0	4,90	2,08	2,60	125,0	2,11	2,57	121,8	123,4	8,10
17,5	5,90	2,12	2,56	120,8	2,18	2,50	114,7	117,7	8,49
20,0	6,61	2,16	2,52	116,7	2,37	2,31	97,5	107,1	9,34
23,5	7,61	2,31	2,37	102,6	2,50	2,18	87,2	94,9	10,54
27,0	8,61	2,50	2,18	87,2	2,60	2,08	80,0	83,6	11,96
30,5	9,61	2,65	2,03	76,6	2,68	2,00	74,6	75,6	13,22
34,0	10,61	2,70	1,98	73,3	2,74	1,94	70,8	72,1	13,88
37,5	11,61	2,77	1,91	69,0	2,77	1,91	69,0	69,0	14,50
40,0	12,33	2,82	1,86	66,0	2,82	1,86	66,0	66,0	15,16

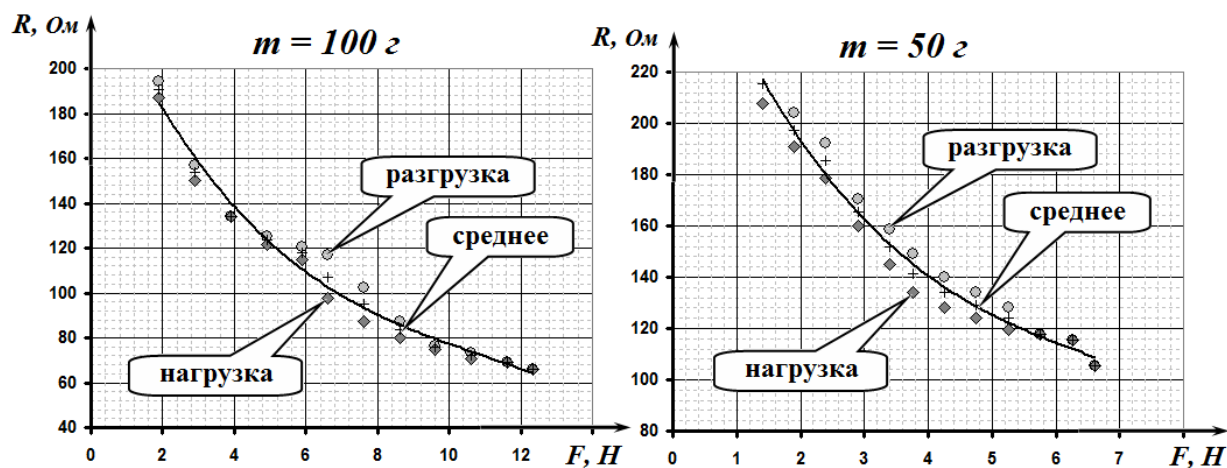
Таблица 4. Зависимость сопротивления от нагрузки ($m = 50 \text{ г}$)

среднее									
** l , см**	** F , Н**	** U_r , В**	** U_x , В**	** R , Ом**	** U_r , В**	** U_x , В**	** R , Ом**	** $\langle R \rangle$, Ом**	** G , мСм**
3,5	1,40	1,45	3,23	222,8	1,52	3,16	207,9	215,3	4,64
7,0	1,90	1,54	3,14	203,9	1,61	3,07	190,7	197,3	5,07
10,5	2,40	1,60	3,08	192,5	1,68	3,00	178,6	185,5	5,39
14,0	2,90	1,73	2,95	170,5	1,80	2,88	160,0	165,3	6,05
17,5	3,40	1,81	2,87	158,6	1,91	2,77	145,0	151,8	6,59
20,0	3,76	1,88	2,80	148,9	2,00	2,68	134,0	141,5	7,07
23,5	4,26	1,95	2,73	140,0	2,05	2,63	128,3	134,1	7,45
27,0	4,76	2,00	2,68	134,0	2,09	2,59	123,9	129,0	7,75
30,5	5,26	2,05	2,63	128,3	2,13	2,55	119,7	124,0	8,06
34,0	5,76	2,15	2,53	117,7	2,15	2,53	117,7	117,7	8,50
37,5	6,26	2,17	2,51	115,7	2,17	2,51	115,7	115,7	8,65
9,50									

40,0	6,61	2,28	2,40	105,3	2,28	2,40	105,3	105,3	9,50
------	------	------	------	-------	------	------	-------	-------	------

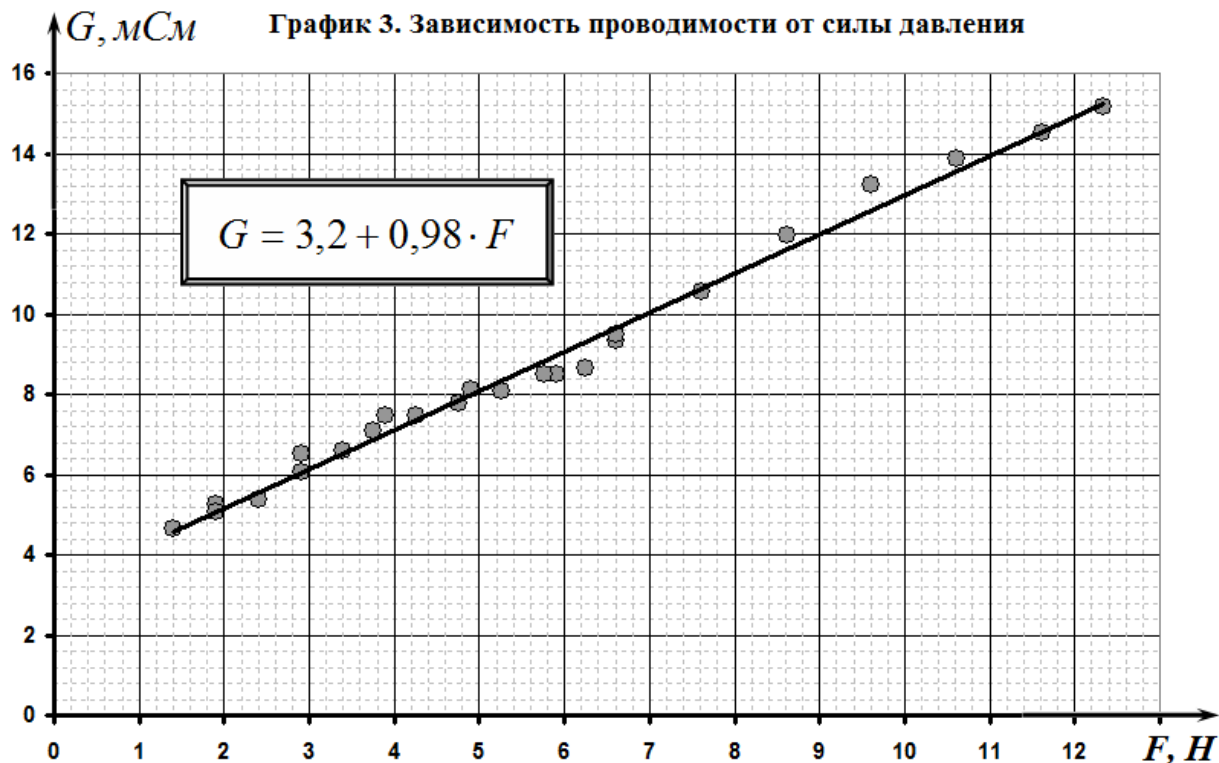
Результаты измерений и последующих расчетов приведены в таблицах 3 и 4. *(Отметим, что по условию задачи для груза $m = 50 \text{ г}$ достаточно было провести измерения только при нагрузке). Ниже показаны графики зависимостей сопротивления от силы давления на таблетку. График 2. Зависимости сопротивления от силы давления

График 2. Зависимости сопротивления от силы давления



Из графиков видно, что незначительный гистерезис деформации наблюдается, однако им можно пренебречь, так как различия не превышают 10%. Более убедительно согласование данных видно на графике 3, где представлена зависимость проводимости таблетки от приложенной к ней силы.

График 3. Зависимость проводимости от силы давления

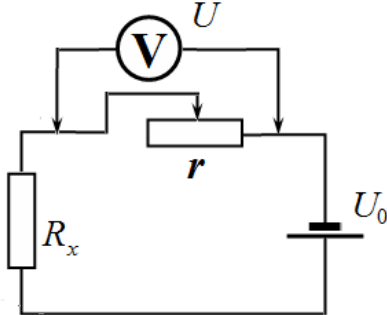


$$G = cF + b. \quad (9)$$

Параметры этой зависимости, найденные по методу наименьших квадратов (напомним, ученикам погрешности рассчитывать не обязательно) равны

$$c = (0,98 \pm 0,04) \frac{\text{мСм}}{\text{Н}}; \quad b = (3,2 \pm 0,3) \text{мСм}. \quad (10)$$

Часть 3. Конструирование весов.



Согласно полученным данным проводимость таблетки линейно зависит от силы давления, следовательно, при постоянном напряжении сила тока (!) через таблетку линейно зависит от силы давления. Поэтому, необходимо подключить таблетку к источнику постоянного напряжения и измерять силу тока. Для ее измерения можно в цепь последовательно включить малый резистор (сопротивление которого значительно меньше сопротивления таблетки) и измерять напряжение на нем. Роль такого резистора может сыграть реостат, причем, изменяя его сопротивление r можно подобрать необходимые параметры установки. Таким образом, мы приходим к следующей схеме измерений.

Расчет напряжения на резисторе (при условии, что $r \ll R_x$) не представляет труда и с учетом полученных ранее формул, приводит к результату

$$\begin{aligned} U &= I \cdot r = U_0 G r = U_0 (cF + b) r = U_0 \left(c \cdot \left(F_0 + mg \frac{l}{a} \right) + b \right) r = \\ &= U_0 r (cF_0 + b) + U_0 c r m g \frac{l}{a} \end{aligned} \quad (11)$$

Осталось только подобрать необходимые параметры. Для повышения чувствительности весов примем $\frac{l}{a} = 10$ (т.е. $l = 35$ см). Тогда слагаемое в формуле (11), зависящее от измеряемой массы груза (в граммах) равно

$$U_0 c r m g \frac{l}{a} = 4,68 \cdot 0,98 \cdot 10 \cdot 10 \cdot \frac{m}{1000} r \approx m,$$

если $r \approx 2,2$ Ом. При этом значении сопротивление постоянное слагаемое в формуле (11) оказывается равным

$$m_0 = U_0 (cF_0 + b) r \approx 40 \text{ мВ}.$$

Настраивать установку можно следующим образом: собираем цепь, не помещая груза, с помощью движка реостата выводим напряжение до 40 мВ, после этого на расстоянии 35 см устанавливаем измеряемый груз.