

### В этой задаче не требуется оценка погрешностей!

Экспериментальная установка состоит из подвижной и неподвижной частей. Неподвижная часть (см. рисунок 1) представляет собой медную трубку, закреплённую в вертикальном положении. Для фиксации трубки используется брусок со сквозным отверстием, который крепится к столу с помощью струбцины, а в отверстие бруска плотно вставляется трубка.

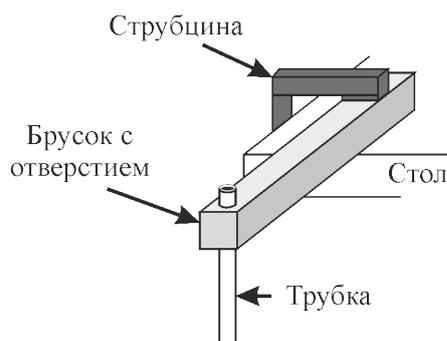


Рис. 1: Неподвижная часть.

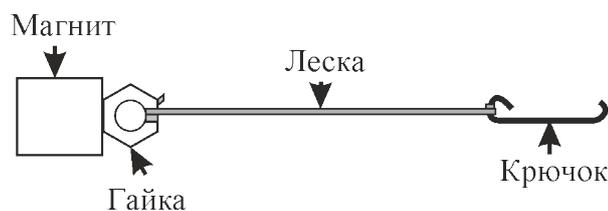


Рис. 2: Подвижная часть.

Подвижная часть (см. рисунок 2) представляет собой цилиндрический магнит, к торцу которого прикреплена гайка, выполняющая роль кольца, за которое к магниту на леске можно подвешивать грузы. В роли грузов выступают гайки. Для крепления гаек к леске используется крючок, изготовленный из медной проволоки. В зависимости от цели, для сборки подвижной части можно использовать как длинный, так и короткий отрезок лески.

Если поместить магнит с подвесом внутрь медной трубки и отпустить его, магнит будет двигаться внутри трубки вниз без сухого трения (если магнит иногда задевает стенки трубки, то этим можно пренебречь). При движении магнита в медной трубке возникают силы вязкого трения магнитной природы. Эти силы тормозят магнит и не дают ему падать вниз с ускорением свободного падения.

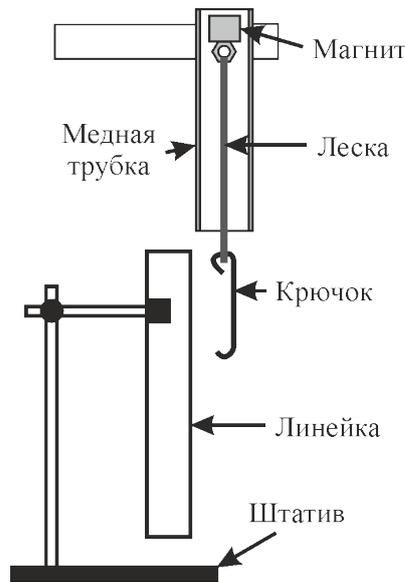
**Задание**

Рис. 3: Схема экспериментальной установки.

1. Измерьте и запишите массу одной гайки  $m_T$ , массу крючка  $m_K$  и магнита  $m_M$ . Учтите, что магнит притягивается к электронным весам, следует придумать, описать и использовать способ, позволяющий корректно взвесить магнит на весах.
2. Соберите установку, схематично изображённую на рисунке 3. Изучите движение магнита с подвесом внутри трубки и установите, является ли движение магнита равномерным. Для этого измерьте зависимость координаты  $x$  магнита от времени  $t$  (начало отчёта может быть любым, ось координат направлена вертикально вверх).
3. Измерьте зависимость средней скорости  $v$  падения магнита в трубке от массы  $M$  всей подвижной части. Определите характер зависимости силы вязкого трения, действующего на магнит, от скорости движения магнита в трубке: пропорциональна ли сила скорости ( $F = k_1 v$ ) или её квадрату ( $F = k_2 v^2$ )? Вычислите величину  $k_1$ , если верен первый вариант, или величину  $k_2$ , если верен второй вариант.
4. Если некоторая нить перекинута через цилиндр и скользит по его боковой поверхности в направлении, перпендикулярном оси цилиндра, то силы натяжения нити  $T_1$  и  $T_2$  с разных сторон от места прилегания нити к цилиндру будут отличаться (см. рисунок 4). Это происходит из-за наличия силы сухого трения скольжения. Независимо от величин сил натяжения их отношение будет постоянным при неизменном угле намотки нити на поверхность (в данной задаче угол намотки, соответствующий половине оборота нити вокруг цилиндра, составляет  $180^\circ$ ):

$$T_2 = \gamma T_1. \quad (1)$$

Повторите эксперимент, перекинув леску с крючком через трубку (см. рисунок 5). Измерьте зависимость скорости  $v$  движения магнита от суммарной массы  $m$  подвешенных грузов. На основе полученных данных рассчитайте с максимальной точностью отношение сил натяжения нитей с двух сторон от трубки  $\gamma$  (см. примечание).

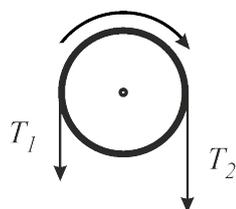


Рис. 4: Натяжение нити, перекинутой через цилиндр.

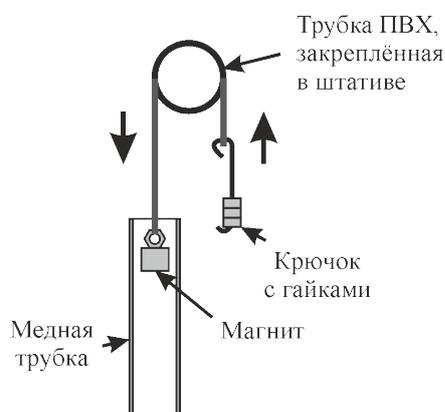


Рис. 5: Схема экспериментальной установки.

**Оборудование.** Толстая медная трубка, брусок с отверстием, струбцина, весы, ножницы, магнит, длинный отрезок лески ( $\sim 110$  см), короткий отрезок лески ( $\sim 30$  см), штатив с лапкой, трубка ПВХ, 21 гайка, отрезок медной проволоки, секундомер, линейка 50 см.

**Примечание.** Напрямую к магниту можно прикреплять только одну гайку – гайку, выполняющую роль кольца, за которое подвешивается леска с грузом (см. рисунок 2).

*Решение*

1. Чтобы измерить массу магнита на электронных весах, поставим на весы брусок в вертикальном положении. Включим и тарируем весы. После этого поместим на верхний торец бруска магнит.

Масса магнита:

$$m_{\text{м}} = (3.72 \pm 0.03) \text{ г.}$$

Для взвешивания гаек используем «метод рядов». Измерим массу 20 гаек:

$$20m_{\text{г}} = (6.49 \pm 0.03) \text{ г.}$$

Масса одной гайки:

$$m_{\text{г}} = (324.5 \pm 1.5) \text{ мг.}$$

Масса крючка из медной проволоки (на разных установках массы могут немного отличаться):

$$m_{\text{к}} = (0.53 \pm 0.03) \text{ г.}$$

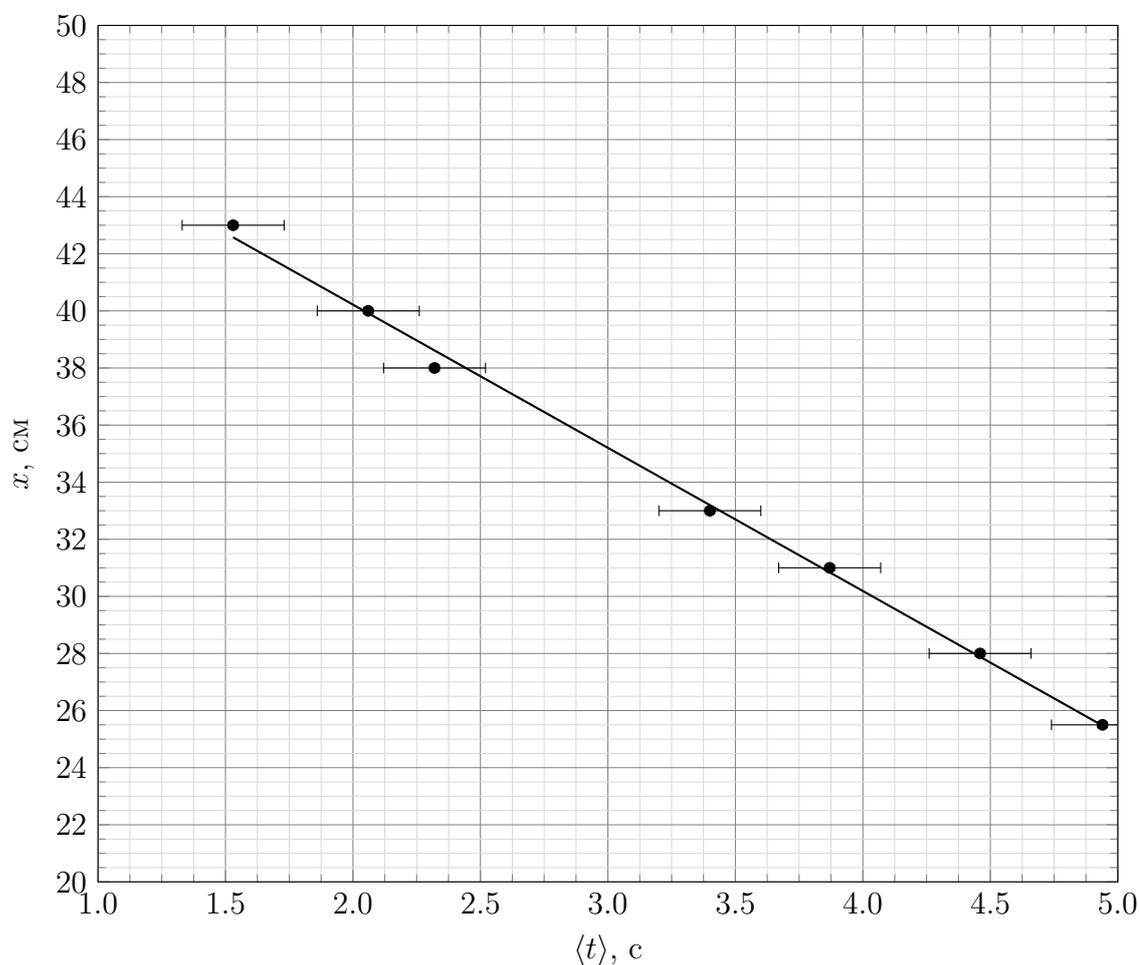
2. Измерим зависимость координаты  $x$  магнита от времени  $t$  его движения. С помощью линейки зафиксируем линейку в штативе так, чтобы отметка 50 см находилась сверху (по условию ось  $X$  направлена вверх). Для того, чтобы наблюдать за движением магнита в трубке, длину подвеса из лески следует выбирать такой, чтобы при прохождении магнита с подвесом через трубку при любом положении магнита в трубке нижний конец лески с крючком находился вне нее. Тогда мы сможем визуально наблюдать за движением подвеса с гайками, а, значит, получим возможность изучить движение магнита в трубке. Для сборки подвижной части используем короткий отрезок лески.

При каждом измерении будем запускать секундомер, когда крючок находится на отметке  $x_0 = 50$  см, и останавливать, когда крючок достигает координаты  $x$ . Для каждой координаты  $x$  будем измерять время  $t$  трижды, далее вычислим среднее арифметическое. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Построим график зависимости  $x(t)$  (см. рисунок 6). Заметим, что график хорошо описывается линейной функцией, что говорит о том, что скорость магнита в трубке устанавливается постоянной сравнительно быстро, а движение магнита в трубе можно считать равномерным.

Таблица 1: Результаты измерений.

$x$ , см	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$\langle t \rangle$ , с
43	1.51	1.53	1.56	1.53
40	2.09	2.03	2.06	2.06
38	2.28	2.22	2.47	2.32
33	3.31	3.47	3.41	3.40
31	3.91	3.69	4.00	3.87
28	4.56	4.41	4.41	4.46
26	4.84	5.03	4.96	4.94

Рис. 6: График зависимости  $x(t)$ .

3. Измерим зависимость средней скорости  $v$  падения магнита в трубке от массы  $M$  всей подвижной части. Будем последовательно увеличивать массу груза на конце лески и измерять время, за которое магнит будет проходить от начала трубки до её конца. Длина трубки:  $L = (24.0 \pm 0.2)$  см (длина трубок на разных установках может отличаться примерно на 1 см). Общую массу подвижной части будем вычислять на основе данных, измеренных в начале задачи:

$$M = Nm_{\Gamma} + m_{\kappa} + m_{\text{M}}. \quad (2)$$

Результаты измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2: Результаты измерений.

$N$	$t_1, \text{c}$	$t_2, \text{c}$	$t_3, \text{c}$	$t_4, \text{c}$	$\langle t \rangle, \text{c}$	$M, \text{г}$	$v, \text{см/с}$
0	4.91	5.00	4.84	4.84	4.90	4.56	4.90
2	4.34	4.22	4.25	4.40	4.30	5.21	5.58
4	3.69	3.72	3.79	3.78	3.75	5.86	6.41
6	3.40	3.44	3.56	3.59	3.50	6.51	6.86
8	3.18	3.10	3.15	3.21	3.16	7.16	7.59
10	2.97	3.00	2.90	2.91	2.95	7.81	8.15
12	2.69	2.78	2.71	2.75	2.73	8.46	8.78
14	2.46	2.47	2.47	2.44	2.46	9.11	9.76
16	2.25	2.31	2.28	2.28	2.28	9.76	10.53
18	2.15	2.12	2.07	2.22	2.14	10.41	11.21
20	2.00	2.06	1.97	2.09	2.03	11.05	11.82

Построим график зависимости  $v(M)$  (см. рисунок 7).

На магнит и его грузы действуют две силы: суммарная сила тяжести всех компонентов системы  $Mg$  и сила магнитного сопротивления  $F$ . Так как движение магнита в трубе равномерно, указанные силы равны друг другу по модулю:

$$F = Mg. \quad (3)$$

Линейность графика  $v(M)$  говорит о том, что скорость  $v$  движения магнита пропорциональна силе тяжести  $Mg$ . Таким образом, мы можем утверждать, что сила сопротивления движению магнита будет пропорциональна скорости:

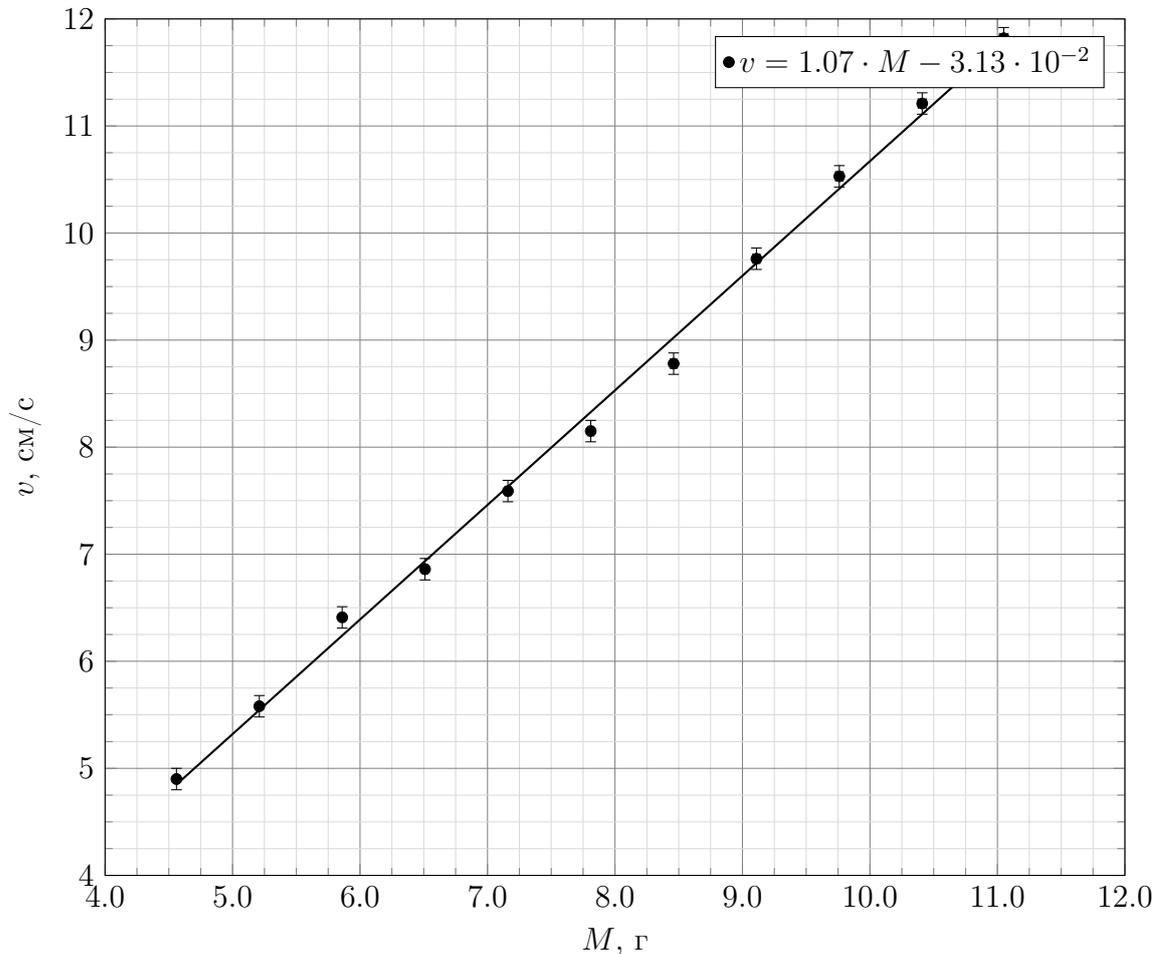
$$F = k_1 v. \quad (4)$$

Коэффициент  $A$  определим из углового коэффициента графика:

$$k_1 = 1.07 \text{ см}/(\text{г} \cdot \text{с}).$$

$$k = \frac{F}{v} = \frac{g}{A} = 0.92 \text{ кг/с}. \quad (5)$$

4. С помощью штатива закрепим в горизонтальном положении ПВХ-трубку. Соберём подвижную часть, используя длинный отрезок лески. Перекинем через неё леску

Рис. 7: График зависимости  $v(M)$ .

с грузом. При малой массе груза  $m$  магнит будет перевешивать груз, и движение лески будет происходить в сторону магнита. Запишем уравнения для сил  $T_1$  и  $T_2$ :

$$T_1 = (Nm_{\Gamma} + m_{\kappa})g, \quad (6)$$

$N$  – количество гаек на крючке.

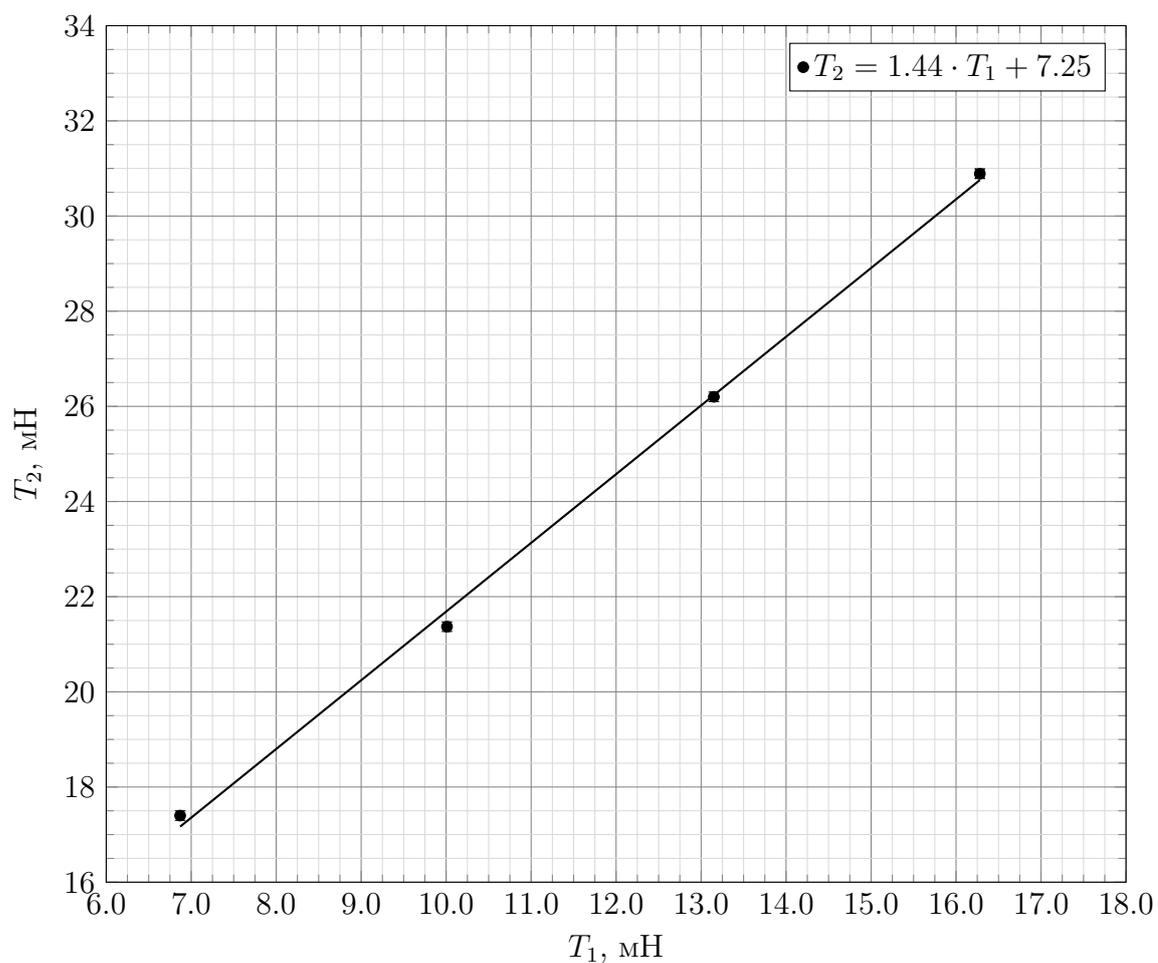
$$T_2 = (m_{\text{м}} + m_{\Gamma})g - kv. \quad (7)$$

Изменяя количество гаек на крючке, измерим зависимость времени прохождения магнитом трубки от количества гаек. Для каждого значения  $N$  вычислим  $T_1$  и  $T_2$ . Результаты измерений приведены в таблице 3.

Построим график зависимости  $T_2(T_1)$  (см. рисунок 8).

Таблица 3: Результаты измерений.

$N$	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$\langle t \rangle, \text{с}$	$v, \text{см/с}$	$T_1, \text{мН}$	$T_2, \text{мН}$
1	10.44	9.87	10.65	10.32	24.03	6.87	14.26
2	12.09	13.01	12.65	12.58	19.71	10.01	18.23
3	17.12	17.78	16.63	17.18	14.44	13.15	23.06
4	26.37	26.88	26.57	26.61	9.32	16.28	27.75

Рис. 8: График зависимости  $T_2(T_1)$ .

Результат:

$$\gamma = 1.44$$

Заметим, что график  $T_2(T_1)$  не проходит через точку  $(0, 0)$ . Это происходит из-за возникновения сухого трения в моменты, когда магнит задевает трубку при движении.