



# Республиканская физическая олимпиада 2025 года (3 этап)

Экспериментальный тур

## *Условия и решения задач 10 класс (для жюри)*

Задания экспериментального тура данной олимпиады предоставляют для участников большие возможности для самостоятельного выбора параметров установок, диапазонов исследования, методов измерений. Иными словами – проявить свои творческие способности. Кроме того, результаты измерений сильно зависят от предоставленного оборудования, которое может различаться в разных областях нашей Республики.

Поэтому, относитесь к приведенным ниже результатам, как к ориентировочным. Желательно (или даже обязательно) провести собственные измерения. Поэтому здесь приводятся только основные теоретические положения и результаты некоторых измерений, полученные авторами данных заданий. Методы обработки результатов измерений являются в большинстве своем, стандартными, поэтому подробно не описываются.



### Задание 10-1. Влажный воздух

#### Оборудование.

Для каждого участника: набор для изучения газовых законов в сборе (комплектация: колба с отводом, пробка резиновая с электронным термометром, Т-образный штуцер с пластиковыми трубками на двух краях, манометр (предел измерения 300мм.рт.ст), шприц пластмассовый (60мл, поршень должен быть установлен на отметку «0»), в колбу перед сборкой установки должно быть налито 2 - 3мл воды комнатной температуры), контейнер пластиковый (1,8л), кружка пластиковая (1,0л), салфетки бумажные для удаления капель воды.

На кабинет: барометр, ведро с горячей водой (2шт, по 10л), чайник электрический (2шт), термометр для определения температуры воды в вёдрах (в вёдрах температура воды должна быть 60 - 65°C), на каждого участника должно быть приготовлено 1,0л горячей воды.

*Внимание:* Колба должна находиться или в картонной коробке или в пластиковом контейнере. Ни в коем случае не ставьте колбу просто на стол, она не устойчива, упадёт и разобьётся. Электронный термометр включается и выключается нажатием красной кнопки. При длительной работе термометр может сам выключиться. Повторное включение осуществляется нажатием красной кнопки.

#### Часть 1. Теоретическая

**1.1** Пусть в цилиндре закрытом подвижным поршнем находится идеальный газ. В начальный момент давление в цилиндре  $P$ , объём газа  $V$ . Пусть изотермически объём цилиндра увеличился на малую величину  $\Delta V$ , а давление изменилось на малую величину  $\Delta P$ . Получите уравнение зависимости  $|\Delta P|(\Delta V)$ . *Подсказка:* произведением малых величин можно пренебречь. Какой математический вид имеет эта зависимость?

Если не знаете как получить уравнение не теряйте время, приступайте к выполнению следующих пунктов.

Погрешности в данной задаче вычислять не нужно. Проверьте есть ли в колбе 2-3мл воды. Если нет, обратитесь к организаторам олимпиады, чтобы они добавили воду в колбу.

Объём воздуха в экспериментальной установке при положении поршня шприца на отметке «0»  $V_1 = 710\text{см}^3$ , плотность ртути  $\rho = 13,6 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ,  $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

#### Часть 2. Экспериментальная

**2.1** Определите атмосферное давление  $P_0$ , температуру  $T_0$  и относительную влажность  $\varphi$  воздуха в колбе.

*Внимание!* Сейчас Вам нужно будет провести экспериментальное исследование. Сначала обдумайте, заготовьте таблицу, а потом выполняйте.

**2.2** Перед началом эксперимента колба должна находиться в картонной коробке. Наполните контейнер горячей водой (объём воды 0,7 - 0,8л). Поместите колбу в горячую воду, при этом придерживайте колбу, она будет всплывать. Наблюдайте за показаниями манометра и термометра. (Если показания манометра через 5 - 10 с не стали изменяться, значит Ваша установка неисправна. Обратитесь за помощью к организаторам олимпиады.) Прогрейте колбу несколько минут. Дождитесь чтобы показания термометра перестали увеличиваться (показания могут меняться на  $0,1^{\circ}\text{C}$  в большую и меньшую сторону вблизи некоторого значения). Под давлением воздуха поршень шприца может сместиться. Верните поршень на отметку «0» и удерживайте его рукой. Если показания термометра не растут или стали немного уменьшаться, можно приступать к измерениям. Вам необходимо будет получить данные сразу для трёх параметров, то есть исследовать сразу две зависимости. Обозначим:  $P_m$  - показания манометра (мм.рт.ст.),  $\Delta V$  - изменение объёма установки (объём воздуха в шприце ( $\text{см}^3$ ),  $t$  - температура воздуха в колбе ( $^{\circ}\text{C}$ ). Исследуйте зависимости  $P_m(\Delta V)$  и  $P_m(t)$ . Для этого последовательно смещайте поршень шприца на несколько делений и записывайте значения параметров. Если поршень шприца не смещается под давлением воздуха, то сдвигайте его самостоятельно. Результаты оформите таблично. **Внимание!** После окончания эксперимента колбу поставьте в коробку.

**2.3** Вычислите работу воздуха при расширении.

**2.4** Определите математический вид зависимости  $|\Delta P|(\Delta V)$ , где  $|\Delta P| = P_{m1} - P_{mi}$ ,  $P_{m1}$  - показания манометра при наибольшей температуре,  $P_{mi}$  - показания манометра при  $i$ -том измерении. Запишите уравнение зависимости  $|\Delta P|(\Delta V)$  с числовыми коэффициентами. Сравните полученное уравнение с уравнением, полученным в п.1.1. Можно ли считать процесс, исследованный в п.2.2, изотермическим, если пренебречь изменением температуры? Почему?

**2.5** Постройте график зависимости  $\Delta v(\Delta V)$ , где  $\Delta v = v_1 - v_i$ ,  $v_1$  - количество вещества в экспериментальной установке при наибольшей температуре,  $v_i$  - количество вещества при  $i$ -том измерении. Как изменялось количество вещества газа в экспериментальной установке в ходе эксперимента? В чём физическая причина этого изменения?

### Часть 3. Гипотетическая

Предположим, что колба была бы без воды (с воздухом влажности такой как в кабинете).

**3.1** Какое бы давление  $P'_1$  установилось бы в колбе если бы воздух прогрелся до наибольшей температуры в Вашем эксперименте.

**3.2** Определите математический вид зависимости  $|\Delta P'|(\Delta V)$ , где  $|\Delta P'| = P'_1 - P'_i$ ,  $P'_i$  - давление воздуха при значении температуры и объёма воздуха в колбе для  $i$ -того измерения. Запишите уравнение зависимости  $|\Delta P'|(\Delta V)$  с числовыми коэффициентами.

**3.3** Сравните графики построенные в п. 2.4 и п. 3.2. Чем отличаются эти графики и в чём физическая причина этих отличий?

### Задание 10-1. Влажный воздух

#### Решение

#### Часть 1. Теоретическая

1.1 Уравнение изотермического процесса для двух состояний воздуха в колбе:

$$PV = (P - |\Delta P|)(V + \Delta V) \quad (1).$$

Раскроем скобки:

$$PV = PV - |\Delta P|V + P\Delta V - |\Delta P|\Delta V \quad (2).$$

В уравнении (2) пренебрегаем  $|\Delta P|\Delta V$  как произведением малых величин, получим:

$$|\Delta P| = \frac{P}{V}\Delta V \quad (3).$$

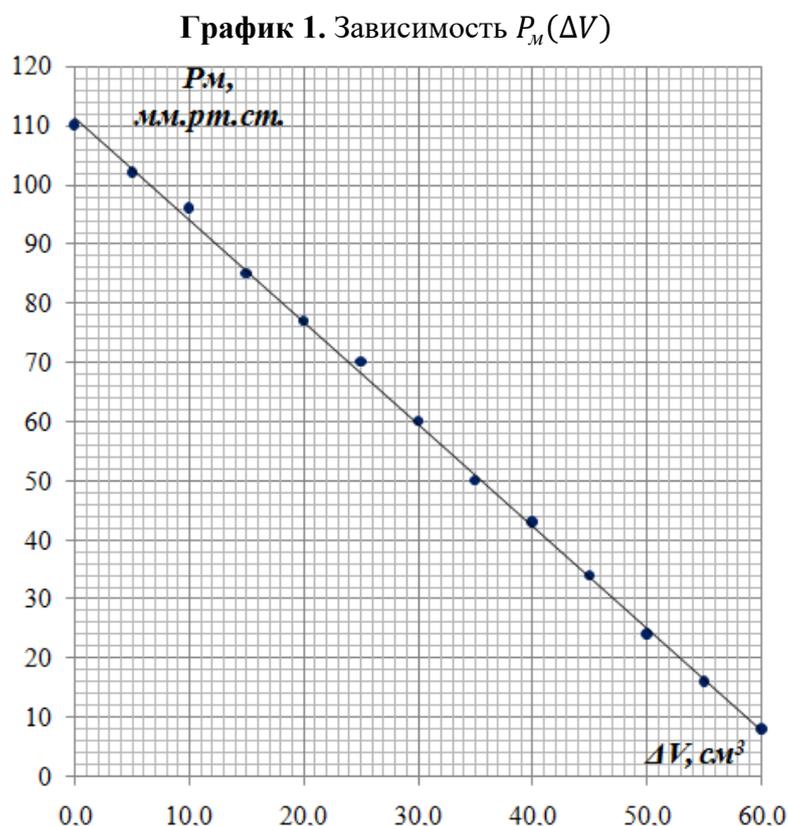
#### Часть 2. Экспериментальная

2.1  $P_0 = (734 \pm 1)$ мм.рт.ст.,  $t_0 = (21,9 \pm 0,1)^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 100\%$ .

#### 2.2

Таблица 1. Значения параметров			
№	$\Delta V,$ $\text{см}^3$	$P_m,$ мм.рт.ст.	$t^\circ\text{C}$
1	0,0	110	44,1
2	5,0	102	44,0
3	10,0	96	44,0
4	15,0	85	43,9
5	20,0	77	43,8
6	25,0	70	43,8
7	30,0	60	43,7
8	35,0	50	43,3
9	40,0	43	43,0
10	45,0	34	42,7
11	50,0	24	42,4
12	55,0	16	42,1
13	60,0	8	41,8

#### 2.3



Построим график зависимости  $P_M(\Delta V)$ . Видим что зависимость линейная. Используя простую графическую обработку (ПГО) определяем:

$P_{max} = 111$  мм. рт. ст.,  $P_{min} = 8$  мм. рт. ст.,  $\Delta V_{max} = 60,0$  см<sup>3</sup>.

Работу воздуха при расширении определим как:

$$A = \frac{P_{max} + P_{min}}{2} \Delta V_{max} + P_0 \Delta V_{max} = \left( \frac{P_{max} + P_{min}}{2} + P_0 \right) \Delta V_{max} \quad (4).$$

Давление переводим в паскалы, объём в метры кубические, получим:

$$A = 13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \left( \frac{0,111\text{м} + 0,008\text{м}}{2} + 0,734\text{м} \right) \cdot 60,0 \cdot 10^{-6} \text{м}^3 = 6,4 \text{ Дж.}$$

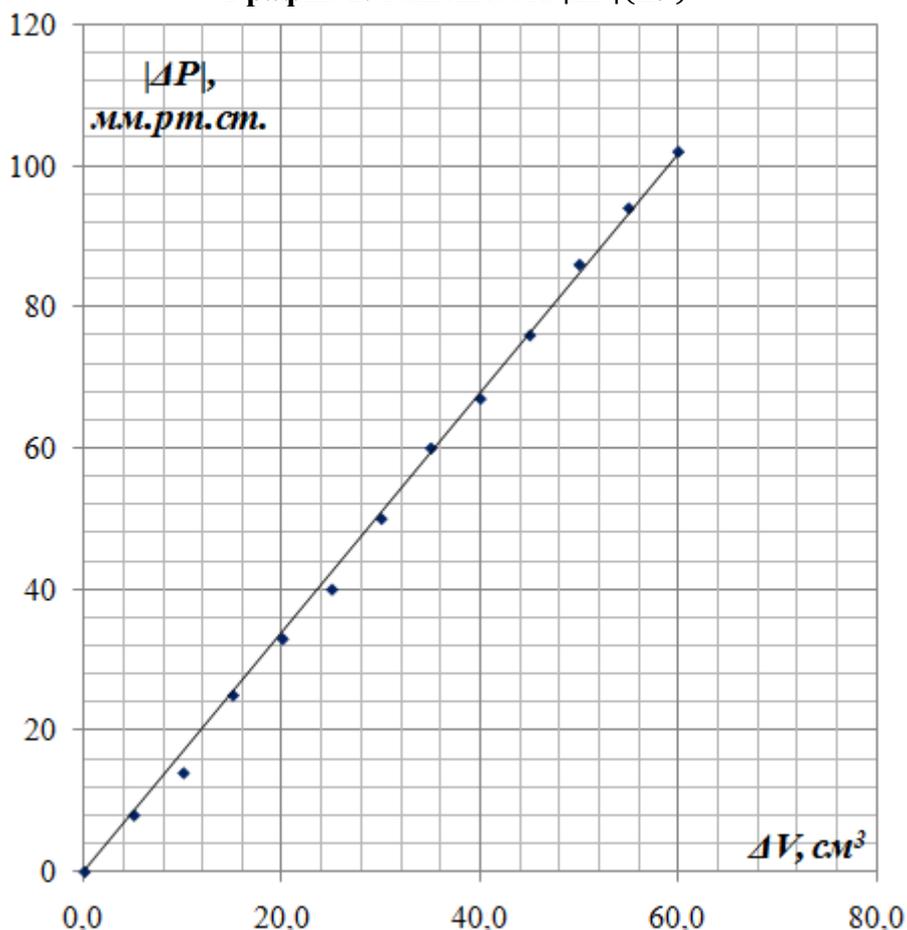
2.4 Определим значения  $|\Delta P|$  и построим график зависимости  $|\Delta P|(\Delta V)$ .

**Таблица 2.**

Зависимость  $|\Delta P|(\Delta V)$

$\Delta V, \text{см}^3$	$ \Delta P ,$ мм.рт.ст.
0,0	0
5,0	8
10,0	14
15,0	25
20,0	33
25,0	40
30,0	50
35,0	60
40,0	67
45,0	76
50,0	86
55,0	94
60,0	102

**График 2.** Зависимость  $|\Delta P|(\Delta V)$



Из графика видим, что зависимость  $|\Delta P|(\Delta V)$ , прямо пропорциональная. Используя ПГО, определим угловой коэффициент наклона усредняющей прямой:

$$k = 1,7 \frac{\text{мм. рт. ст.}}{\text{см}^3}.$$

Уравнение зависимости  $|\Delta P|(\Delta V)$  с числовыми коэффициентами запишется:

$$|\Delta P| = 1,7\Delta V \quad (\text{мм. рт. ст.}) \quad (5).$$

Уравнения (3) и (5) выражают прямо пропорциональную зависимость  $|\Delta P|(\Delta V)$ , однако, процесс исследованный в п.2.2 изотермическим считать нельзя, так как в ходе процесса изменяется количество вещества, а это как увидим в дальнейшем существенно влияет на значение углового коэффициента усредняющей прямой.

**2.5**  $\nu_i$  определим, используя уравнение Клапейрона-Менделеева:

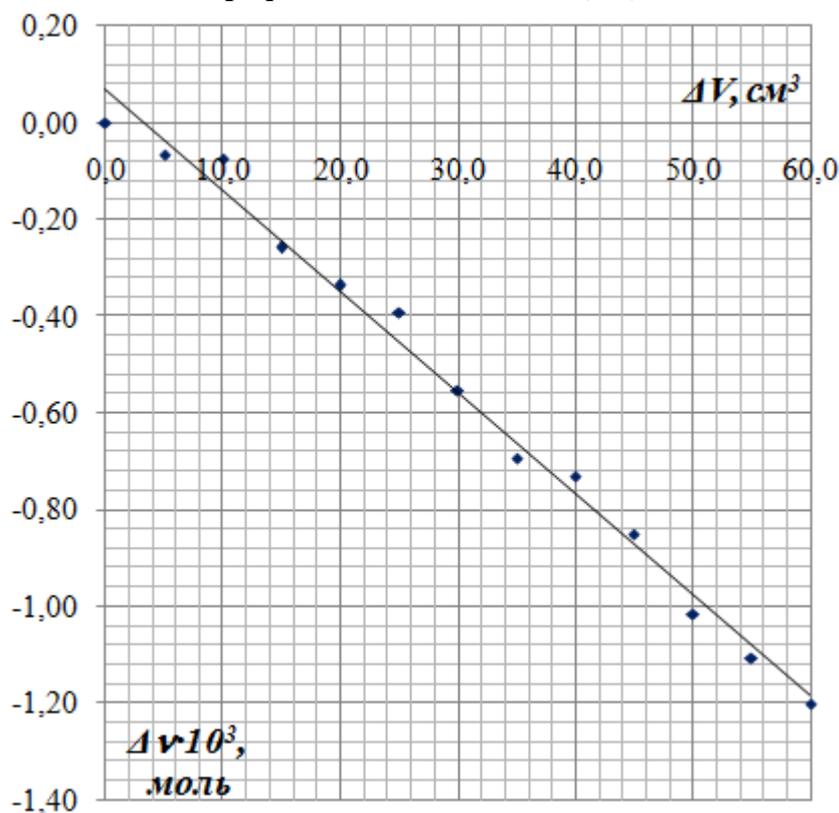
$$\nu_i = \frac{P_i V_i}{RT_i} = \frac{(P_0 + P_{mi})(V_1 + \Delta V_i)}{R(273 + t_i)} \quad (6).$$

Результаты вычислений представлены в таблице 3

**Таблица 3.**  
Зависимость  $\Delta \nu(\Delta V)$

№	$\Delta V, \text{см}^3$	$\Delta \nu \cdot 10^3, \text{моль}$
1	0,0	0,00
2	5,0	-0,07
3	10,0	-0,07
4	15,0	-0,26
5	20,0	-0,34
6	25,0	-0,39
7	30,0	-0,55
8	35,0	-0,69
9	40,0	-0,73
10	45,0	-0,85
11	50,0	-1,02
12	55,0	-1,11
13	60,0	-1,20

**График 3.** Зависимость  $\Delta \nu(\Delta V)$



Из таблицы и графика видим, что количество вещества газа в ходе эксперимента линейно убывало с увеличением объёма установки. Физическая причина этого в том, что с увеличением объёма установки уменьшалась и температура воздуха в

колбе, что приводило к конденсации водяного пара и уменьшению количества вещества данной компоненты.

### Часть 3. Гипотетическая

**3.1** С воздухом происходил бы изохорный процесс, поэтому давление  $P'_1$  вычислим используя уравнение изохорного процесса:

$$P'_1 = P_0 \frac{T_1}{T_0} = 734 \text{ мм. рт. ст.} \cdot \frac{(273 + 44,1) \text{ К}}{(273 + 21,9) \text{ К}} = 789 \text{ мм. рт. ст.} \quad (7).$$

**3.2** Значения  $P'_i$  определим используя уравнение Клапейрона:

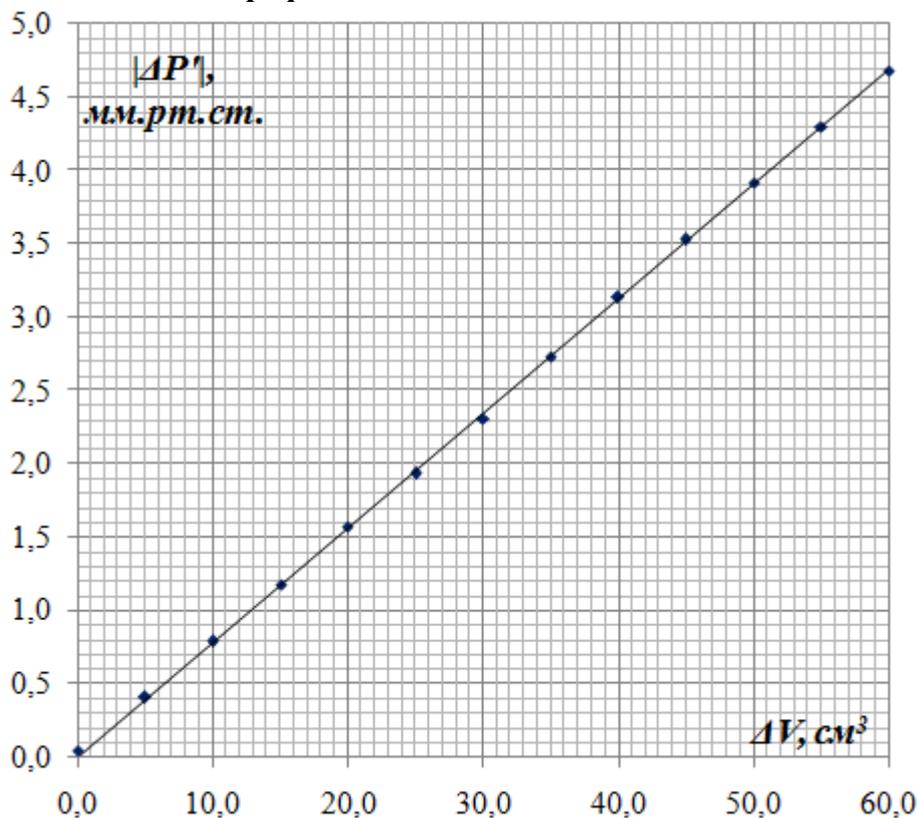
$$P'_i = \frac{P'_1 V_1 (273 + t_i)}{(273 + t_1)(V_1 + \Delta V_i)} \quad (8).$$

Вычислим значения  $|\Delta P'|$ . Результаты представлены в таблице 4. Построим график зависимости  $|\Delta P'|(\Delta V)$

**Таблица 4.**  
Зависимость  
 $|\Delta P'|(\Delta V)$

№	$\Delta V, \text{ см}^3$	$ \Delta P' $ мм.рт.ст.
1	0,0	0,0
2	5,0	0,4
3	10,0	0,8
4	15,0	1,2
5	20,0	1,6
6	25,0	1,9
7	30,0	2,3
8	35,0	2,7
9	40,0	3,1
10	45,0	3,5
11	50,0	3,9
12	55,0	4,3
13	60,0	4,7

**График 4.** Зависимость  $|\Delta P'|(\Delta V)$



Из графика видим, что зависимость  $|\Delta P'|(\Delta V)$ , прямо пропорциональная. Используя ПГО, определим угловой коэффициент наклона усредняющей прямой:

$$k = 0,078 \frac{\text{мм. рт. ст.}}{\text{см}^3}.$$

Уравнение зависимости  $|\Delta P'|(\Delta V)$  с числовыми коэффициентами запишется:

$$|\Delta P'| = 0,078\Delta V \quad (\text{мм. рт. ст.}) \quad (9).$$

**3.3** Графики построенные в п. 2.4 и п. 3.2. отличаются значением угловых коэффициентов усредняющих прямых. Причина данного отличия в том, что в эксперименте п.2.2 в газовой смеси, содержащейся в колбе, одной из компонент является насыщенный водяной пар, что приводит к большему значению давления в колбе и к большему изменению давления в результате конденсации пара.

## Задание 10-2. Трение и вращение

**Оборудование:** Динамометры (2,5Н, 5,0Н, 10,0Н), дощечка (размеры 10х45см), грузы (10шт. по 100г. без крючков), линейка деревянная (40см), кнопка канцелярская (1шт), четыре кусочка пластилина (для крепления дощечки к столешнице), петелька из нити (для зацепа линейки динамометром), скотч тонкий, ножницы.

### Часть 1

Закрепите дощечку на столешнице с помощью кусочков пластилина. Положите на дощечку линейку, как показано на рисунке 1. В дощечке закрепите кнопку. О неё должен опираться один край линейки. На линейку поместите грузы в столбик (10шт), если столбик не устойчив, скрепите его скотчем. В данной части задачи Вам предстоит исследовать зависимость силы  $F$ , прилагаемой к одному из краёв линейки с помощью динамометра, необходимой для сдвига линейки, от расстояния  $x$  между грузами на линейке и точкой опоры (рис.1).

- 1.1. Получите зависимость  $F(x)$  теоретически.
- 1.2. Проверьте полученную Вами зависимость экспериментально. Результаты оформите в виде таблицы и графически.
- 1.3. Используя результаты эксперимента, вычислите коэффициент трения  $\mu_1$

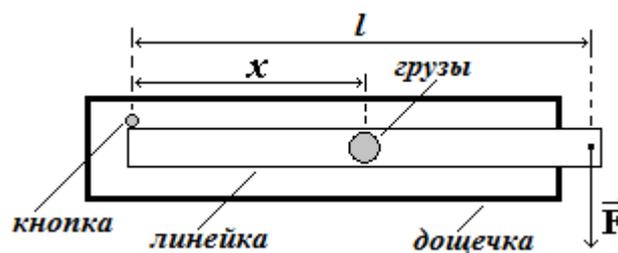


Рисунок 1.

линейки о доску. Рассчитайте погрешности.  $g = (9,81 \pm 0,01) \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

### Часть 2

В данной части задачи Вам предстоит исследовать зависимость силы  $F$ , необходимой для сдвига линейки, прилагаемой к одному из её краёв, от массы грузов  $m$ . Грузы размещайте от точки опоры на расстоянии  $l_1 = 0,8l$  (рис. 2).

- 2.1. Получите зависимость  $F(m)$  теоретически.
- 2.2. Проверьте полученную Вами зависимость экспериментально. Результаты оформите в виде таблицы и графически. *В целях экономии времени в таблицу сразу записывайте среднее значение силы.*

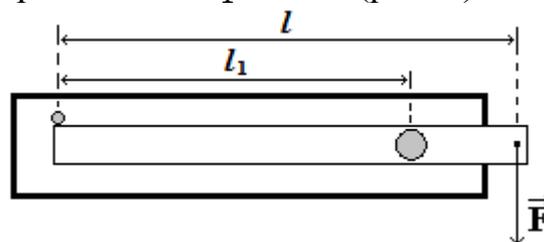


Рисунок 2.

- 2.3 Используя результаты эксперимента, вычислите коэффициент трения  $\mu_2$  линейки о доску. Рассчитайте погрешности.

### Часть 3

В данной части задачи Вам предстоит исследовать зависимость силы  $F$ , необходимой для сдвига линейки, прилагаемой к одному из её краёв, от расстояния  $x$  между точкой опоры и линией действия силы (рис.3). На линейку поместите грузы в столбик (10шт), если столбик не устойчив, скрепите его скотчем.

3.1 Получите зависимость  $F(x)$  теоретически.

3.2 Проверьте полученную Вами зависимость экспериментально. Результаты оформите в виде таблицы и графически. *В таблицу сразу записывайте среднее значение силы.*

3.3 Используя результаты эксперимента, вычислите коэффициент трения  $\mu_3$  линейки о доску. Рассчитайте погрешности.

3.4 Сравните значения  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  и  $\mu_3$  полученные в п.1.3, п.2.3 и п.3.3. Можно ли их считать одинаковыми, почему? Укажите возможную причину отличий их средних значений.

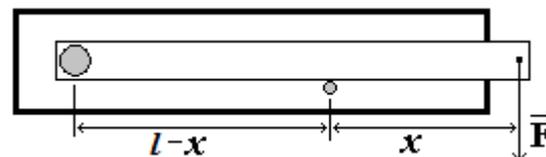


Рисунок 3.

## Задание 10-2. Трение и вращение

### Решение

#### Часть 1

1.1 При сдвиге линейки на неё действуют момент силы  $Fl$ , прилагаемой со стороны динамометра и моменты сил трения. Правило моментов запишется следующим образом:

$$Fl = \mu mgx + M \quad (1),$$

где  $\mu mgx$  - момент силы трения обусловленной весом грузов (считаем, что плечо данной силы равно  $x$ ),  $M$  - суммарный момент сил трения некоторым образом распределённых по поверхности линейки, обусловленных в том числе и весом линейки.

Из (1) получим:

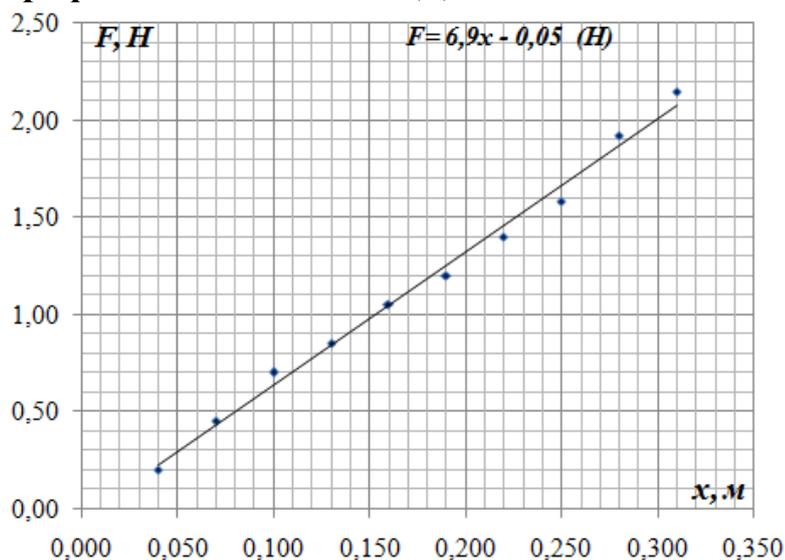
$$F = \frac{\mu mg}{l} x + \frac{M}{l} \quad (2).$$

1.2  $l = (40,2 \pm 0,1)\text{см}$ ,  $m = (1,00 \pm 0,01)\text{кг}$ .

**Таблица 1.** Экспериментальные данные зависимости  $F(x)$ .

Показания динамометра			$\langle F \rangle$ , Н	$x$ , м
Повторные измерения $F_i$ , Н				
1	2	3		
0,20	0,20	0,20	0,20	0,040
0,45	0,45	0,45	0,45	0,070
0,70	0,65	0,75	0,70	0,100
0,90	0,80	0,85	0,85	0,130
1,00	1,10	1,05	1,05	0,160
1,15	1,25	1,20	1,20	0,190
1,45	1,40	1,35	1,40	0,220
1,60	1,55	1,60	1,58	0,250
1,95	1,90	1,90	1,92	0,280
2,10	2,20	2,15	2,15	0,310
		сред	1,15	0,175
		дисп	0,354	0,007
		ковар	0,051	
		N	$b_1$	$a_1$
		10	-0,05	6,9
			$\Delta b_1$	$\Delta a_1$
			0,08	0,5

**График 1.** Зависимость  $F(x)$



Построив график зависимости  $F(x)$  видим, что данная зависимость близка к прямо пропорциональной. Используя МНК определим угловой коэффициент

наклона усредняющей прямой и свободное слагаемое данной зависимости, вычислим абсолютные погрешности данных величин (табл. 1).

Угловой коэффициент наклона усредняющей прямой

$$a_1 = (6,9 \pm 0,5) \frac{\text{Н}}{\text{М}}$$

Свободное слагаемое

$$b_1 = (-0,05 \pm 0,08)\text{Н}.$$

### 1.3

Угловой коэффициент наклона усредняющей прямой

$$\frac{\mu_1 mg}{l} = a_1 \quad (3).$$

Из (3) получим:

$$\langle \mu_1 \rangle = \frac{\langle a_1 \rangle \langle l \rangle}{\langle m \rangle \langle g \rangle} = \frac{6,9 \frac{\text{Н}}{\text{М}} \cdot 0,402 \text{М}}{1,00 \text{кг} \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}} = 0,28 \quad (4).$$

Относительная погрешность  $\mu_1$

$$\varepsilon_{\mu_1} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a_1}{\langle a_1 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{\langle l \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{\langle m \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{\langle g \rangle}\right)^2} \quad (5).$$

Погрешностью величин  $l$  и  $g$  можем пренебречь, получим:

$$\varepsilon_{\mu_1} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a_1}{\langle a_1 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{\langle m \rangle}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,5 \frac{\text{Н}}{\text{М}}}{6,9 \frac{\text{Н}}{\text{М}}}\right)^2 + \left(\frac{0,01 \text{кг}}{1,00 \text{кг}}\right)^2} = 0,073 = 7,3\% \quad (6),$$

$$\Delta \mu_1 = \langle \mu_1 \rangle \cdot \varepsilon_{\mu_1} = 0,28 \cdot 0,073 = 0,02 \quad (7),$$

$$\mu_1 = 0,28 \pm 0,02.$$

Отметим, что абсолютная погрешность свободного слагаемого превышает его среднее значение. Это значит, что начало координат по вертикальной оси попадает в интервал абсолютной погрешности свободного слагаемого. Это подтверждает прямо пропорциональную зависимость  $F(x)$ . Следовательно, вторым слагаемым в уравнении (2) можно пренебречь и записать его в виде:

$$F = \frac{\mu mg}{l} x \quad (8)$$

Это значит можно полагать, что сила трения, действующая на линейку приложена под грузами.

## Часть 2

### 2.1

В данном случае правило моментов сил запишется следующим образом:

$$Fl = \mu mgl_1 + M \quad (9),$$

откуда

$$F = \frac{\mu gl_1}{l} m + \frac{M}{l} \quad (10).$$

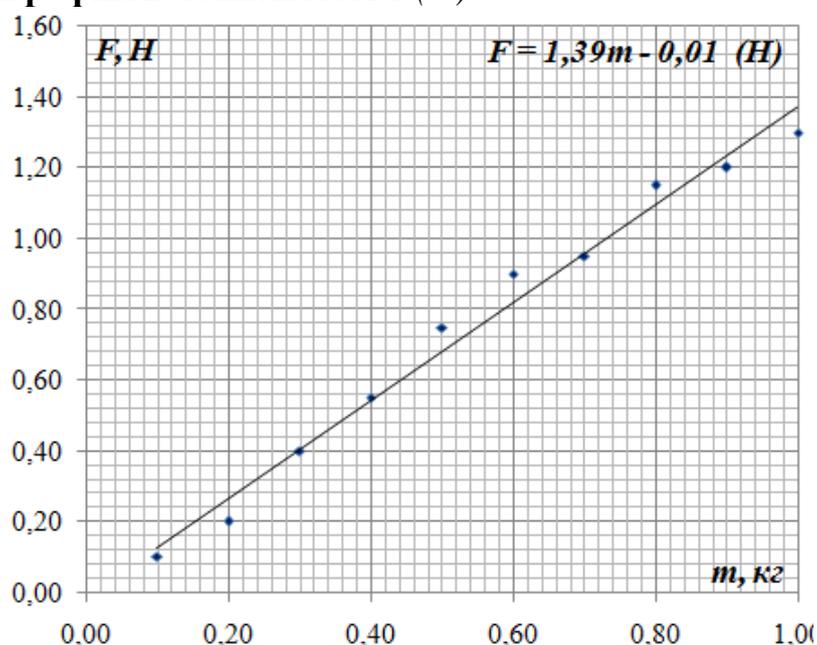
2.2  $l = (40,2 \pm 0,1)\text{см}$ ,  $l_1 = (32,0 \pm 0,1)\text{см}$ .

**Таблица 2.**

Экспериментальные данные зависимости  $F(m)$ .

	Масса грузов $m$ , кг	$\langle F \rangle$ , Н
	0,100	0,10
	0,200	0,20
	0,300	0,40
	0,400	0,55
	0,500	0,75
	0,600	0,90
	0,700	0,95
	0,800	1,15
	0,900	1,20
	1,000	1,30
сред	0,550	0,75
дисп	0,083	0,162
ковар		0,115
N	$a_2$	$b_2$
10	1,39	-0,01
	$\Delta a_2$	$\Delta b_2$
	0,13	0,08

**График 2.** Зависимость  $F(m)$



Построив график зависимости  $F(m)$  видим, что данная зависимость так же близка к прямо пропорциональной. Используя МНК определим угловой коэффициент наклона усредняющей прямой и свободное слагаемое данной зависимости, вычислим абсолютные погрешности данных величин (табл. 2).

Угловой коэффициент наклона усредняющей прямой

$$a_2 = (1,39 \pm 0,13) \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$$

Свободное слагаемое

$$b_2 = (-0,01 \pm 0,08)\text{Н}.$$

### 2.3

Угловой коэффициент наклона усредняющей прямой

$$\frac{\mu_2 g l_1}{l} = a_2 \quad (11).$$

Из (11) получим:

$$\langle \mu_2 \rangle = \frac{\langle a_2 \rangle \langle l \rangle}{\langle l_1 \rangle \langle g \rangle} = \frac{1,39 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 0,402 \text{ м}}{0,320 \text{ м} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 0,18 \quad (12).$$

Относительная погрешность  $\mu_2$

$$\varepsilon_{\mu_2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a_2}{\langle a_2 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{\langle l \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_1}{\langle l_1 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{\langle g \rangle}\right)^2} \quad (13).$$

Погрешностью величин  $l$ ,  $l_1$  и  $g$  можем пренебречь, получим:

$$\varepsilon_{\mu_2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a_2}{\langle a_2 \rangle}\right)^2} = \frac{\Delta a_2}{\langle a_2 \rangle} = \frac{0,13 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}}{1,39 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}} = 0,094 = 9,4\% \quad (14),$$

$$\Delta \mu_2 = \langle \mu_2 \rangle \cdot \varepsilon_{\mu_2} = 0,18 \cdot 0,094 = 0,02 \quad (15),$$

$$\mu_2 = 0,18 \pm 0,02.$$

Также отметим, что абсолютная погрешность свободного слагаемого превышает его среднее значение. Это значит, что начало координат по вертикальной оси попадает в интервал абсолютной погрешности свободного слагаемого. Это подтверждает прямо пропорциональную зависимость  $F(m)$ . Следовательно, вторым слагаемым в уравнении (2) можно пренебречь и записать его в виде:

$$F = \frac{\mu g l_1}{l} m \quad (16).$$

Это значит, что в данном случае тоже можно считать, что сила трения, действующая на линейку приложена под грузами.

### Часть 3

3.1 Правило моментов сил запишется следующим образом:

$$F x = \mu m g (l - x) + M \quad (17).$$

После преобразований получим:

$$F = (\mu m g l + M) \frac{1}{x} - \mu m g \quad (18).$$

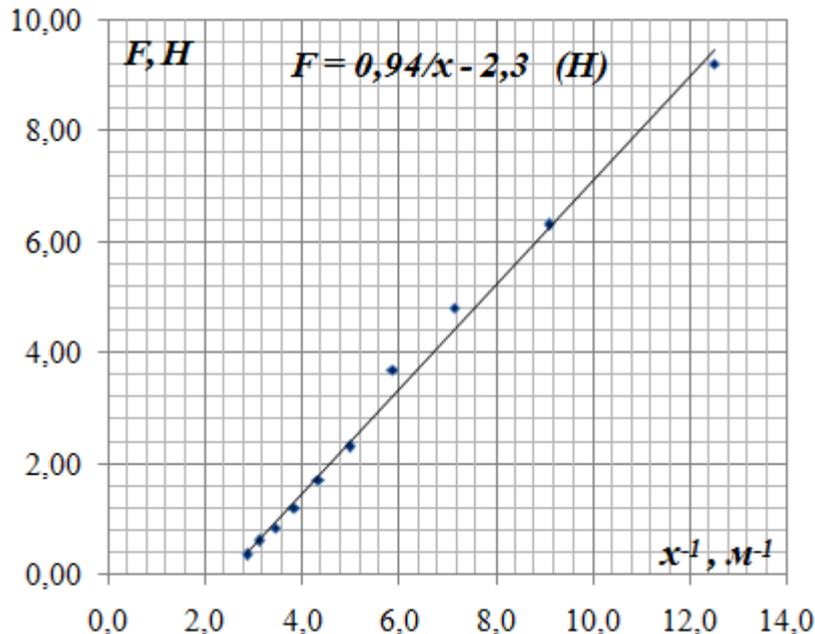
3.2  $l = (39 \pm 1)\text{см}$ ,  $m = (1,00 \pm 0,01)\text{кг}$ .

**Таблица 3.**

Зависимость  $F(x)$

$x, \text{ м}$	$1/x, 1/\text{м}$	$\langle F \rangle, \text{ Н}$
0,35	2,9	0,35
0,32	3,1	0,60
0,29	3,4	0,85
0,26	3,8	1,20
0,23	4,3	1,70
0,20	5,0	2,30
0,17	5,9	3,70
0,14	7,1	4,80
0,11	9,1	6,30
0,08	13	9,20
сред	5,72	3,10
дисп	8,54	7,58
ковар		8,02
N	$a_3$	$b_3$
10	0,94	-2,3
	$\Delta a_3$	$\Delta b_3$
	0,05	0,4

**График 3.** Зависимость  $F\left(\frac{1}{x}\right)$



Построив график зависимости  $F(x)$  видим, что данная зависимость линейная. Используя МНК определим угловой коэффициент наклона усредняющей прямой и свободное слагаемое данной зависимости, вычислим абсолютные погрешности данных величин (табл. 2).

Угловой коэффициент наклона усредняющей прямой

$$a_3 = (0,94 \pm 0,05)\text{Н} \cdot \text{м}.$$

Свободное слагаемое

$$b_3 = (-2,3 \pm 0,4)\text{Н}.$$

3.3 В данном случае коэффициент трения находим через свободное слагаемое  $b_3$ .

$$\mu_3 mg = |b_3| \quad (19),$$

откуда

$$\langle \mu_3 \rangle = \frac{|b_3|}{\langle m \rangle \langle g \rangle} = \frac{2,3\text{Н}}{1,00\text{кг} \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}} = 0,23 \quad (20).$$

Относительная погрешность  $\mu_3$

$$\varepsilon_{\mu_3} = \sqrt{\left(\frac{\Delta b_3}{\langle b_3 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{\langle m \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{\langle g \rangle}\right)^2} \quad (21).$$

Погрешностью величины  $g$  можем пренебречь, получим:

$$\varepsilon_{\mu_3} = \sqrt{\left(\frac{\Delta b_3}{\langle b_3 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{\langle m \rangle}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,4\text{Н}}{2,3\text{Н}}\right)^2 + \left(\frac{0,01\text{кг}}{1,00\text{кг}}\right)^2} = 0,17 = 17\% \quad (22),$$

$$\Delta\mu_3 = \langle\mu_3\rangle \cdot \varepsilon_{\mu_3} = 0,23 \cdot 0,17 = 0,04 \quad (23),$$

$$\mu_3 = 0,23 \pm 0,04.$$

Отметим, что абсолютная погрешность свободного слагаемого не превышает его среднее значение. Это значит, что начало координат по вертикальной оси не попадает в интервал абсолютной погрешности свободного слагаемого. Это подтверждает линейную зависимость  $F\left(\frac{1}{x}\right)$ , а следовательно и справедливость уравнения (18). В данном случае эксперимент подтверждает теоретическую модель.

### 3.4

$$\mu_1 = 0,28 \pm 0,02$$

$$\mu_2 = 0,18 \pm 0,02$$

$$\mu_3 = 0,23 \pm 0,04$$

Анализируя результаты видим, что средние значения  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  и  $\mu_3$  не попадают в области перекрытия интервалов их абсолютных погрешностей, значит эти величины различны. Отличие в значениях  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  и  $\mu_3$  погрешностью измерений объяснить нельзя. Одной из причин может быть то, что в разных областях поверхности линейки коэффициент трения имеет разные значения.