

**В задаче не требуется оценка погрешностей!**

**Внимание!** Не распыляйте газ в аудитории и не вдыхайте его! Прокручивание шестеренки на зажигалке более чем на три оборота приводит к неконтролируемому выбросу газа!

**Задание**

Вам выдана зажигалка, внутри которой находится неизвестное вещество (сжиженный газ). Подача газа производится нажатием на маленький рычаг, присоединенный к соплу зажигалки. Скорость подачи газа регулируется черной шестеренкой.

1. Оцените давление насыщенного пара вещества в зажигалке при комнатной температуре.
2. Оцените давление внутри надутого воздушного шарика. Сравните его с атмосферным давлением.
3. Измерьте молярную массу неизвестного вещества.
4. Оцените отношение плотностей жидкой и газообразной фаз неизвестного вещества внутри зажигалки.

**Примечания**

1. Для измерения масс тел, не помещающихся на платформе весов, используйте стакан (без воды) с гайками на дне для его устойчивости. Кнопка "TARE" позволяет принять массу лежащего на весах груза за ноль.
2. Считайте известной молярную массу воздуха  $\mu_{\text{в}} = 29$  г/моль.
3. Комнатную температуру вам сообщат организаторы в начале тура.

**Оборудование.** Зажигалка с неизвестным сжиженным газом, воздушный шарик с впускной системой, иголка с силиконовой трубкой для соединения зажигалки и шарика, линейка, весы, кружка с водой, стакан 0.5 л без воды, гайки.

*Решение*

1. Для оценки давления внутри зажигалки соберем газовый манометр. Закроем один конец выданной трубки при помощи зажима, а на другом конце поместим капельку воды. Для этого достаточно пережать трубку пальцем, погрузить ее под воду и освободить. Измерим расстояние от капельки до закрытого зажимом конца трубки  $l_0 = 11.0$  см. Подключим конец с капелькой к зажигалке. Это приведет к смещению капельки. В новом положении длина столба воздуха между закрытым концом трубки и капелькой станет равной  $l = 5.0$  см. Считая, что процесс смещения капельки изотермический, из закона Бойля-Мариотта получим:

$$P_{\Gamma} = P_0 \frac{l_0}{l} = 2.2 \text{ атм.} \quad (1)$$

2. Повторим эксперимент, заменив зажигалку на надутый шарик. Заметим, что капелька практически не смещается. Поэтому далее будем считать, что давление в шарике равно атмосферному.
3. Для измерения молярной массы вещества внутри зажигалки надуем этим веществом шарик, подсоединив зажигалку к нему при помощи трубки с зажимом. После этого взвесим зажигалку и получим массу вещества в газообразном состоянии внутри воздушного шарика  $m_{\Gamma} = m_{\text{з}}^{(0)} - m_{\text{з}}$ , где  $m_{\text{з}}^{(0)}$  — начальная масса зажигалки с газом. Теперь взвесим шарик (с трубкой, зажимом, впускной системой и иглой), поместив его в стакан с гайками. Изменение показаний весов при его взвешивании по сравнению с ненадутым шариком будет обусловлено не только изменением массы вещества внутри шарика, но и силой Архимеда:

$$\Delta m_{\text{ш}} = m_{\Gamma} - \rho_{\text{в}} V, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{в}}$  — плотность окружающего воздуха,  $V$  — объем воздушного шарика. Для окружающего шарик воздуха можно записать закон Менделеева-Клапейрона:

$$P_0 = \frac{\rho_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}} RT, \quad (3)$$

где  $\mu_{\text{в}}$  — молярная масса воздуха,  $T$  — температура окружающего воздуха. Для вещества внутри шарика также можно записать закон Менделеева-Клапейрона. Считая давление в шарике равным атмосферному, а температуру равной температуре окружающего воздуха, получим:

$$P_0 V = \frac{m_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}} RT, \quad (4)$$

где  $\mu_{\Gamma}$  — молярная масса вещества. Из (3) и (4) получим следующее выражение:

$$\rho_{\text{в}} V = \frac{m_{\Gamma} \mu_{\text{в}}}{\mu_{\Gamma}}. \quad (5)$$

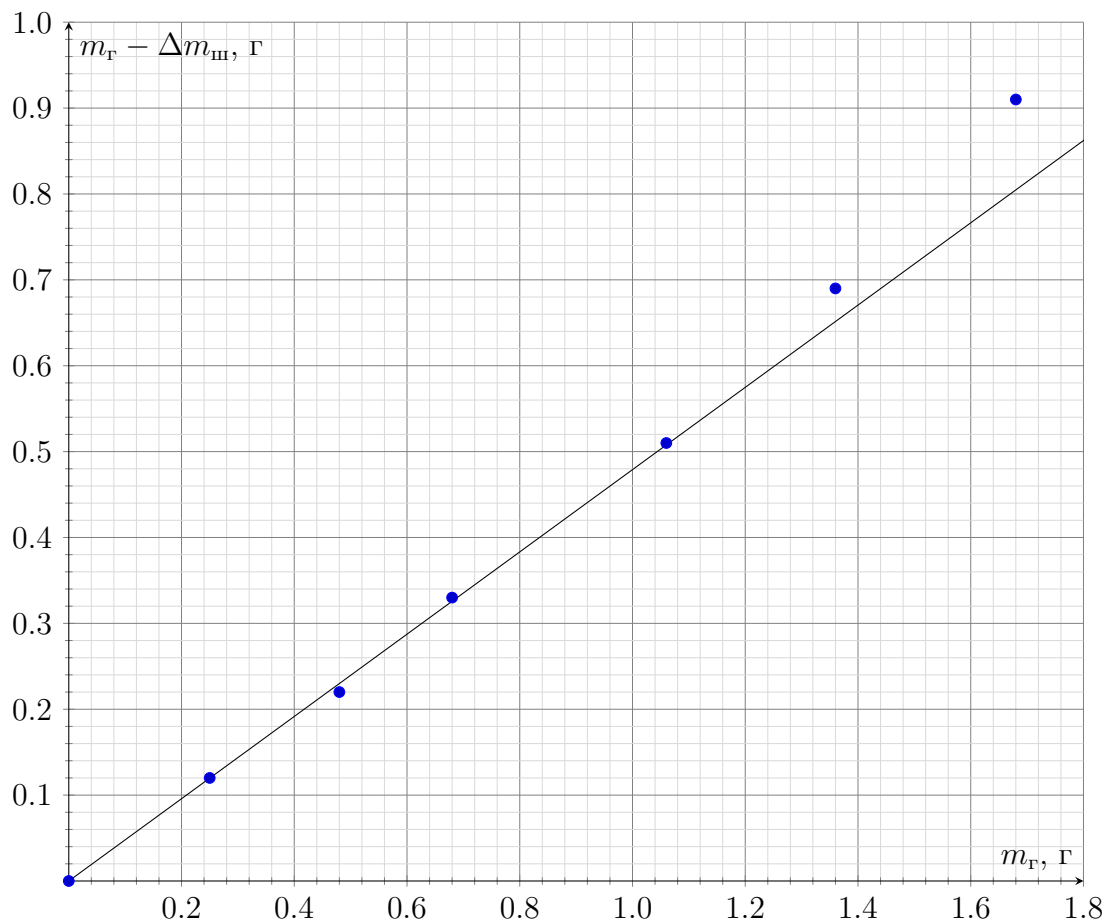
Подставим его в формулу (2):

$$\frac{m_{\Gamma}\mu_{\text{В}}}{\mu_{\Gamma}} = m_{\Gamma} - \Delta m_{\text{ш}}. \quad (6)$$

Повторим описанные измерения для разных масс газа в шарике, получим зависимость  $\Delta m_{\text{ш}}$  от  $m_{\Gamma}$  и построим ее график в координатах  $m_{\Gamma} - \Delta m_{\text{ш}}$  от  $m_{\Gamma}$ . Согласно (6), эта зависимость описывается линейной функцией с угловым коэффициентом, равным отношению молярных масс воздуха и вещества в зажигалке.

| $m_{\Gamma}$ , г | $\Delta m_{\text{ш}}$ , г | $m_{\Gamma} - \Delta m_{\text{ш}}$ , г | $h$ , см |
|------------------|---------------------------|--|----------|
| 0.00             | 0.00                      | 0.00                                   | 2.80     |
| 0.25             | 0.13                      | 0.12                                   | 2.40     |
| 0.48             | 0.26                      | 0.22                                   | 2.10     |
| 0.68             | 0.35                      | 0.33                                   | 1.90     |
| 1.06             | 0.55                      | 0.51                                   | 1.50     |
| 1.36             | 0.67                      | 0.69                                   | 1.10     |
| 1.68             | 0.77                      | 0.91                                   | 0.80     |

График зависимости  $m_{\Gamma} - \Delta m_{\text{ш}}$  от  $m_{\Gamma}$



Из графика хорошо видно, что две верхние точки графика лежат явно выше прямой, проходящей через остальные точки. Это можно объяснить тем, что при больших объемах шарика толщина его стенок становится малой и газ заметно диффундирует через стенки. Из-за этого понижается масса шарика, что и приводит к увеличению вертикальной координаты графика. Однако при больших толщинах шарика диффузия не оказывает значительного эффекта, и экспериментальные точки хорошо описываются исходной теоретической моделью. Угловой коэффициент прямой, описывающей первые точки графика, равен:

$$A_1 = \frac{\mu_{\text{в}}}{\mu_{\text{г}}} = 0.48, \quad (7)$$

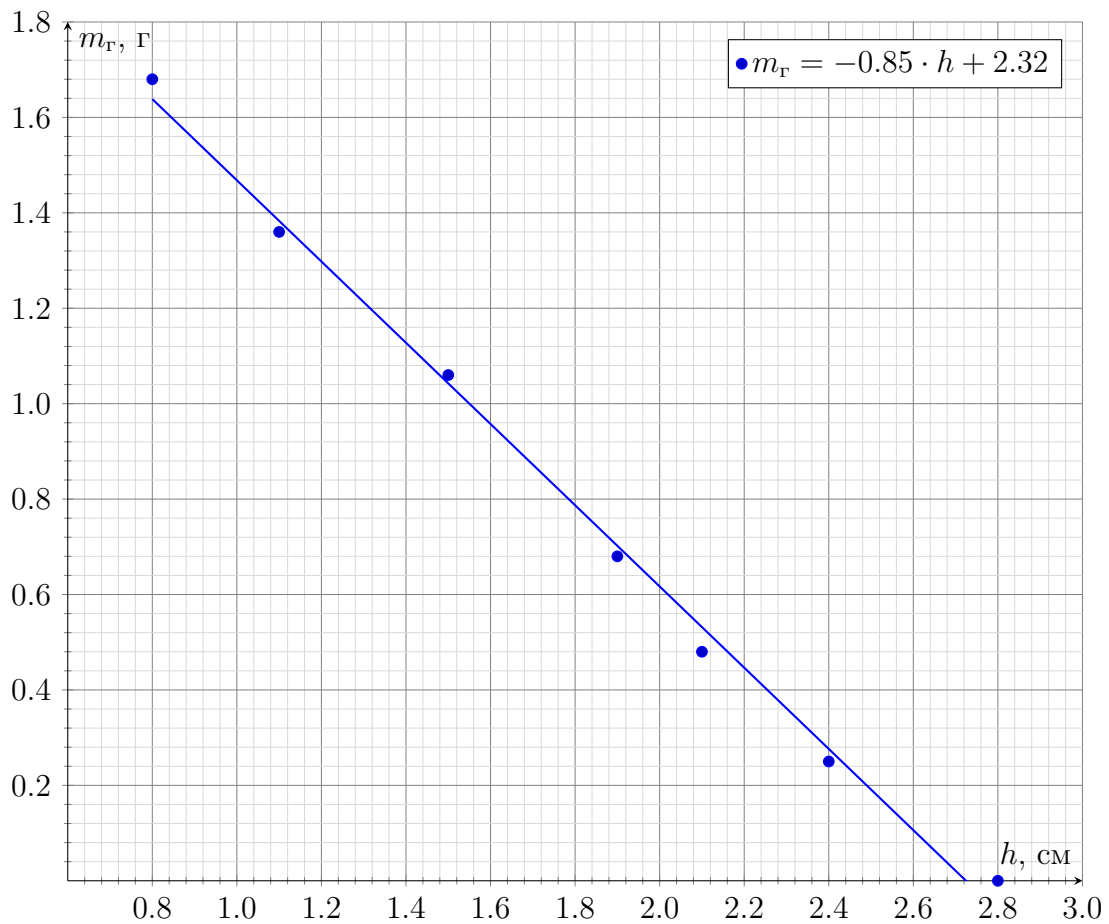
откуда молярная масса вещества:

$$\mu_{\text{г}} = \frac{\mu_{\text{в}}}{A_1} = 60 \frac{\text{г}}{\text{моль}}. \quad (8)$$

4. Плотность газовой фазы вещества внутри зажигалки несложно оценить из закона Менделеева-Клапейрона (температура в день измерений составляла  $T = 22.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ):

$$\rho_{\text{г}} = \frac{P_{\text{г}} \mu_{\text{г}}}{RT} = 5.4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}. \quad (9)$$

Для определения плотности жидкой фазы в процессе выполнения измерений для второго упражнения также будем отмечать уровень жидкости  $h$  внутри зажигалки. Построим график зависимости массы вытекшего вещества  $m_{\text{г}}$  от уровня  $h$ :

График зависимости  $m_\Gamma$  от  $h$ 

Модуль углового коэффициента полученной прямой равен произведению плотности жидкой фазы вещества и площади сечения внутренней части зажигалки:

$$A_2 = \rho_{\text{ж}} S = 0.85 \frac{\text{г}}{\text{см}}. \quad (10)$$

Диаметр внутреннего сечения зажигалки оценим линейкой по виду с ее торцов  $x = 1.4$  см. Таким образом, плотность жидкой фазы вещества составляет:

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{4A_2}{\pi x^2} S = 0.55 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}. \quad (11)$$

Окончательно для отношения плотностей получаем:

$$\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_\Gamma} \approx 100. \quad (12)$$