

Задание 10.1. Газировка (Аполонский А.).

Часть 1. (8 баллов). С помощью выданного Вам оборудования определите давление воды внутри бутылки газировки. Считайте, что внутри бутылки находится углекислый газ в газообразном состоянии и вода с растворённым в ней углекислым газом. Согласно закону Генри количество газа, растворённого в жидкости, над которой находится этот же газ, прямо пропорционально давлению этого газа $\nu = \alpha VP$, где V – объём жидкости, P – давление газа, $\alpha = 3,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{моль}}{\text{Па} \cdot \text{м}^3}$ для углекислого газа, растворяемого в воде.

Атмосферное давление $P_0 = 10^5$ Па, комнатную температуру считайте равной $T = 300$ К, молярная масса углекислого газа $\mu_{CO_2} = 44$ г/моль.

В первой части работы оценивать погрешность не нужно.

Часть 2. (7 баллов). С помощью выданного Вам оборудования проверьте справедливость закона Генри, получив три точки для зависимости количества растворённого газа от давления: одну - при атмосферном давлении, вторую - при давлении больше атмосферного и третью - при давлении меньше атмосферного. Подробно опишите Ваши действия и вычислите значение коэффициента α , сравнив его с данным в условии.

Оборудование: две бутылки с газированной водой, стаканчик, шприц объёмом 20 мл, затычка для шприца, салфетки для поддержания чистоты рабочего места.

Примечания:

- 1) Рекомендуем одну бутылку использовать для пробных экспериментов, а вторую для итогового. Не рекомендуем трясти бутылку перед тем, как её открывать.
- 2) Если вода находится в спокойном состоянии, то концентрация растворённого в ней газа приходит в равновесное состояние за относительно длительное время, но если воду перемешивать или взбалтывать, то равновесное состояние устанавливается гораздо быстрее.

Возможное решение

Часть 1. Откроем бутылку и аккуратно наберём из неё некоторое количество газировки в пустой шприц (около 5 мл). Сразу же заткнём кончик шприца затычкой. Поскольку бутылка была только что открыта, концентрация растворённого в ней углекислого газа соответствует давлению внутри бутылки (так как концентрация изменяется медленно).

Теперь будем трясти шприц, помогая растворённому газу перейти в газообразное состояние, при этом поршень шприца должен иметь возможность свободно перемещаться, обеспечивая равенство давления внутри шприца атмосферному.

Спустя некоторое время (около 10 минут) концентрация растворённого углекислого газа придёт в соответствие атмосферному давлению, а его газообразные излишки соберутся над водой.

Для воды в бутылке: $\nu_0 = \alpha V_B P_{\text{бут}}$, где V_B – объём воды, набранной в шприц, $P_{\text{бут}}$ – давление газа в бутылке, ν_0 – количества газа, растворённого в воде внутри бутылки.

Для воды в шприце после достижения равновесия: $\nu_0 - \nu_r = \alpha V_B P_0$, где ν_r – количество нерастворённого углекислого газа в шприце.

Запишем уравнение состояния идеального газа: $P_0 V_r = \nu_r RT$, где V_r – объём нерастворённого газа в шприце.

Из записанных выше уравнений получим: $\alpha V_B P_{\text{бут}} - \frac{P_0 V_r}{RT} = \alpha V_B P_0$, откуда

$$P_{\text{бут}} = P_0 \left(1 + \frac{V_r}{\alpha V_B RT} \right).$$

Измерения:

$V_B = 4$ мл, $V_r = 6$ мл

$$P_{\text{бут}} = P_0 \left(1 + \frac{V_r}{\alpha V_B RT} \right) = 10^5 \left(1 + \frac{6}{3,5 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 8,31 \cdot 300} \right) = 2,7 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Часть 2. Для получения дополнительных точек зависимости количества растворённого газа от давления будем внутри шприца создавать другие давления. (Содержимое шприца осталось от первого эксперимента). Придерживая наконечник шприца, надавим на поршень с заметным усилием, и будем потряхивать шприц около 10 минут, добиваясь равновесной концентрации растворённого газа. Затем определим объём, занимаемый газом, продолжая также давить на поршень. Обозначим его V_r' . Теперь аккуратно отпустим поршень и измерим объём газа под поршнем сразу же после этого; обозначим его V_r .

Так как между замерами V_r' и V_r прошло мало времени, то концентрация растворённого в воде газа не успела измениться. Давление газа под сжатым поршнем можем получить из уравнения состояния идеального газа. $P = P_0 \frac{V_r}{V_r'}$.

Согласно закона Генри $\nu = \alpha V_B P$, тогда $\Delta \nu = \alpha V_B \Delta P$.

Для нашего опыта $\Delta P = P - P_0 = P_0 \left(\frac{V_r}{V_r'} - 1 \right)$, а $\Delta \nu = -\Delta \nu_r = -P_0 \frac{(V_r - V_{r0})}{RT}$, где V_{r0} – объём газа под поршнем при атмосферном давлении и при концентрации растворённого газа, соответствующей атмосферному давлению.

LIV Всероссийская олимпиада школьников по физике
Региональный этап. Экспериментальный тур. 25 января 2020 г.

Подставив в закон Генри получим: $-P_0 \frac{(V_r - V_{r0})}{RT} = \alpha V_B P_0 \left(\frac{V_r}{V_r'} - 1 \right)$

$$\frac{V_r}{V_B} = \alpha RT \left(1 - \frac{V_r}{V_r'} \right) + V_{r0}$$

$$V_r = -\alpha RT V_B \frac{V_r}{V_r'} + const$$

Проведём аналогичный опыт, только теперь будем вытягивать поршень шприца, создавая под ним давление меньше атмосферного.

Построим график зависимости V_r от $\frac{V_r}{V_r'}$ для трёх точек (атмосферному давлению соответствует точка $(V_{r0}; 0)$)

V_r , мл	V_r' , мл	$\frac{V_r}{V_r'}$	ΔV_r , мл	$\Delta \frac{V_r}{V_r'}$
3,5	2,0	-0,75	0,5	0,69
6,0		0,00	0,5	0,10
8,0	16,0	0,50	0,5	0,05

Убедимся, что три точки лежат на прямой и определим угловой коэффициент этой прямой $k = -3,58$ мл.

Из полученной теоретической зависимости

$$\alpha = -\frac{k}{V_B RT} = \frac{3,58}{4 \cdot 8,31 \cdot 300} = 3,6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{моль}}{\text{Па} \cdot \text{м}^3}$$

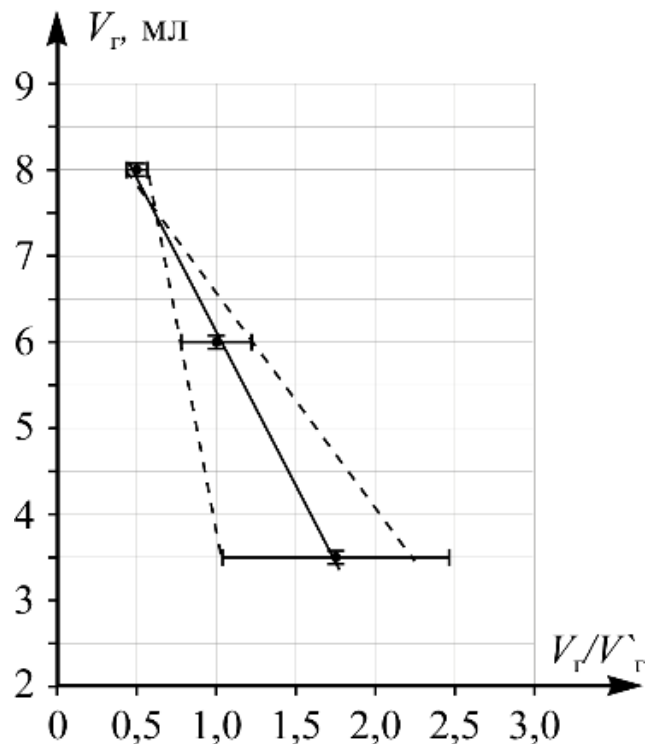
Оценим погрешность.

$$\Delta \frac{V_r}{V_r'} = \frac{V_r}{V_r'} \left(\frac{\Delta V_r}{V_r} + \frac{\Delta V_r'}{V_r'} \right)$$

Погрешность коэффициента k определим из графика по разнице между минимальным и максимальным угловыми коэффициентами.

$$\Delta k = \frac{8,2 - 2,7}{2} = 2,7 \text{ мл}$$

$$\varepsilon \alpha = \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta V_B}{V_B} = 87\%$$



Учитывая теоретическую погрешность α , можно утверждать, что теоретическое значение соответствует экспериментальному.

LIV Всероссийская олимпиада школьников по физике
Региональный этап. Экспериментальный тур. 25 января 2020 г.

Критерии оценивания

1	Предложена идея, позволяющая определить изменение количества растворённого газа при изменении давления. <i>(Если в предложенном методе часть воды из шприца удаляется, и невозможно проконтролировать сколько углекислого газа уходит вместе с водой, то за метод ставится максимум 1 балл)</i>	3 балла
2	Выполнены необходимые измерения, и они соответствуют реальности	1 балл
3	Контроль достижения равновесной концентрации. В работе явно указано, каким образом учащийся контролировал, что концентрация растворённого газа достигла равновесного состояния.	1 балл
4	Выведена теоретическая формула для определения давления внутри бутылки	1 балл
5	Для контрольного эксперимента была открыта новая бутылка воды и это явно указано в работе	1 балл
6	Получен корректный результат для давления внутри бутылки. <i>1,5-2,5 атм</i>	1 балл
7	Предложена рабочая идея, позволяющая измерять количество растворённого газа при давлении большем, чем атмосферное	1,5 балла
8	Предложена рабочая идея, позволяющая измерять количество растворённого газа при давлении ниже атмосферного	1,5 балла
9	Выполнены необходимые измерения	1 балл
10	Построен график для проверки линейности зависимости (на графике подписаны оси, нанесена шкала, присутствуют экспериментальные точки и сглаживающая кривая)	1 балл
11	Получено значение α	1 балл
12	Оценена погрешность α и сделан вывод о соответствии теоретическому значению. <i>(Если нет оценки погрешности, то вывод не засчитывается.)</i>	1 балл

Требования к оборудованию:

1) Бутылки с газированной водой: две бутылки с минеральной **газированной** водой, объёмом 0,5-0,6 литра, не вскрытые. Выдаются участникам при комнатной температуре. Также важно обеспечить минимальное взбалтывание воды. В идеале следует расставить её на рабочие места с вечера и дать отстояться до начала тура. Хорошие результаты получаются с «Аква минерале», но подойдет и другая (лучше без вкусовых добавок).

Каждому участнику выдаются новые бутылки!!!

2) Шприц 20 мл с ценой деления 1 мл, **обязательно с резиновым поршнем**. Поршень внутри шприца должен перемещаться с небольшим трением. Для проверки наберите в шприц воздух примерно на половину объёма шприца, заткните отверстие и надавите на поршень. После прекращения давления поршень должен возвращаться в исходное

LIV Всероссийская олимпиада школьников по физике
Региональный этап. Экспериментальный тур. 25 января 2020 г.

состояние. Также поршень не должен пропускать воздух, если давление внутри шприца больше или меньше атмосферного примерно в 2 раза. Шприц выдается без иглы. **Допускается повторное использование шприца, но лучше иметь запас на случай порчи оборудования предыдущим участником.**

3) Затычка на шприц. Затычка должна надежно надеваться на носик шприца и обеспечивать его герметичность при давлении внутри шприца отличающемся в 2 раза от атмосферного (как в большую, так и в меньшую сторону). Можно изготовить затычку из иглы, идущей в комплекте. Для этого нужно отломать металлическую иглу от пластмассового основания и загерметизировать отверстие иглы. (Например, залить внутрь пластмассового наконечника небольшое количество влагостойкого клея). При этом наконечник должен иметь возможность плотно надеваться на носик шприца. **ВАЖНО!!!** Проверьте герметичность ваших наконечников при давлениях внутри шприца от $2P_{\text{атм}}$ до $0,5P_{\text{атм}}$, так как герметичность наконечника очень важна в этой задаче. **Допускается повторное использование затычки, но лучше иметь запас на случай порчи оборудования предыдущим участником.**

4) Стакан. Любой стакан, например, пластиковый на 200 г. **Допускается повторное использование стакана.**

5) Салфетки. 2-3 бумажные салфетки для поддержания чистоты на рабочем месте.