

Задание 11.1. «Газировка (II)» (Аполонский А.). Некоторые газы хорошо растворяются в жидкостях. Например, углекислый газ прекрасно растворяется в воде, что используется при приготовлении всем хорошо знакомой газировки. При постоянной температуре и не слишком больших давлениях количество газа, растворённого в жидкости, прямо пропорционально парциальному давлению этого газа над жидкостью (закон Генри)

$$v = \alpha Vp.$$

Здесь V – объём жидкости, p – парциальное давление газа, α – коэффициент, зависящий от температуры и измеряемый в моль/(Па · м³).

1. Убедитесь, что сила трения поршня о стенки корпуса шприца мала по сравнению с силой атмосферного давления на поршень. Опишите, как вы это сделали.
2. Определите давление газа в бутылке газированной воды.
3. Определите величину α для углекислого газа и воды при комнатной температуре.

Считайте, что внутри бутылки находятся углекислый газ в газообразном состоянии и вода с растворённым в ней углекислым газом. При аккуратном открытии бутылки (не трясите её и не взбалтывайте перед этим!) за малый промежуток времени изменение концентрации газа в растворе незначительно.

Оборудование: 1) две бутылки минеральной газированной воды; 2) шприц 20 мл; 3) заглушка на шприц; 4) одноразовый стакан 200 мл; 5) одноразовая пластиковая тарелка и салфетки для поддержания рабочего места в чистоте.

Примечания:

- 1) Рекомендуется одну бутылку использовать для пробных экспериментов, а вторую для итоговых. Не рекомендуется 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 (в закрытой бутылке), равновесное состояние устанавливается гораздо быстрее (несколько минут).

Постарайтесь работать аккуратно, чтобы не облить себя и соседей, не залить водой рабочее место! Одноразовая посуда и салфетки выданы Вам для поддержания рабочего места в порядке.

Возможное решение. Силу трения поршня о стенки можно считать несущественной по сравнению с силой давления газа на поршень. В этом можно убедиться, сжимая воздух в пустом шприце, закрытом заглушкой.

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

Будем встряхивать шприц, чтобы ускорить переход системы в равновесное состояние. При этом поршень шприца должен иметь возможность свободно перемещаться, обеспечивая равенство давления внутри шприца атмосферному давлению p_0 . Газ, растворённый в воде, выделяется в газовую фазу при давлении, равном p_0 , и объём под поршнем увеличивается на величину объёма газа V_{Γ} (рис.1).

Спустя некоторое время (5 – 10 минут) установится равновесное состояние, при котором количество растворённого углекислого газа будет соответствовать p_0 , а давление углекислого газа под поршнем равно p_0 .

Для порции воды, набранной в шприц из бутылки, $v_0 = \alpha V_{\text{в}} p$, где $V_{\text{в}}$ – объём воды, набранной в шприц, v_0 – количество растворённого в ней газа, p_0 – давление газа в бутылке. После установления равновесия в воде в растворённом виде

находится $v_{\text{в}} = \alpha V_{\text{в}} p_0$ моль газа, в газовой фазе $v_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma} p_0}{RT}$. Приравнивая $v_0 = v_{\text{в}} + v_{\Gamma}$, получаем:

$$\alpha V_{\text{в}} p = \alpha V_{\text{в}} p_0 + \frac{V_{\Gamma} p_0}{RT},$$

откуда

$$\alpha = \frac{V_{\Gamma} p_0}{RT V_{\text{в}} (p - p_0)}.$$

Повторим измерения несколько раз, в каждом случае аккуратно открывая и тут же закрывая бутылку.

Теперь определим давление углекислого газа в бутылке. Эту процедуру лучше проводить после предыдущих измерений с набором воды в шприц, чтобы минимизировать потери газа. Для этого выдвинем поршень шприца в положение 20 мл, установим заглушку и аккуратно поместим шприц внутрь бутылки с водой, сразу закрыв пробку бутылки. Встряхивая бутылку, периодически наблюдаем за положением поршня в шприце. Через некоторое время (5 – 10 минут) в бутылке установится равновесное дав-



ление p , а объём воздуха в шприце уменьшится от первоначального значения $V_1 = 20$ мл, до некоторого значения $V_2 = V_1 p / p_0$ (рис.2).



Отсюда $p = p_0 V_1 / V_2$.

Отметим, что при выполнении части работы, связанной с помещением шприца в бутылку, потери газа становятся заметными (по нашим данным давление при повторных измерениях уменьшается примерно на 5% при каждом последующем измерении), поэтому это измерение есть смысл с учётом ограниченного количества бутылок выполнять однократно.

Приведём результаты, полученные нами при использовании бутылки (0,5 л) минеральной воды «Аqua minerale»: $V_1 = (20,0 \pm 0,5)$ мл, $V_2 = (7,0 \pm 0,5)$ мл, $p = (2,85 \pm 0,25)$ атм.

Измерения объёма газа под поршнем с целью определения α : $T = 298\text{K}$,

№	V_B , мл	V_T , мл	α , моль / (Па · м ³)
1	6	10,5	$3,8 \cdot 10^{-4}$
2	6	10,5	$3,8 \cdot 10^{-4}$
3	7	11,0	$3,4 \cdot 10^{-4}$
4	5	8,5	$3,7 \cdot 10^{-4}$
5	7,5	12,5	$3,7 \cdot 10^{-4}$

Оценка систематической погрешности определения α :

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta V_T}{V_T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_B}{V_B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(p-p_0)}{(p-p_0)}\right)^2} \approx 0,15.$$

Случайная погрешность для α по данным таблицы: $\Delta\alpha \approx 0,15 \cdot 10^{-4}$ моль / (Па · м³)

Окончательно $\alpha = (3,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$ моль / (Па · м³).

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

Критерии оценивания

1. Предложен и реализован метод проверки малости силы трения поршня о стенки шприца 1 балл
 2. Предложена идея метода определения давления газа в бутылке 2 балла
- Примечание: кроме авторского, возможны иные способы определения давления, связанные с анализом формул, линеаризацией зависимостей и т.д. Большинство таких методов не позволяют получить хорошую точность, и идея такого метода оценивается в 1 балл.*
3. Проведены эксперименты по определению давления газа по предложенному методу и получены численные результаты 1 балл
 4. Результат определения давления в бутылке отличается от результатов контрольных экспериментов, проведённых членами жюри, не более, чем
 - а) на 15% 2 балла
 - б) на 15-30% 1 балл
 5. Проведена разумная оценка систематической погрешности определения давления 0,5 балла
 6. Предложен и доведён до формул осуществимый метод определения коэффициента α 2 балла
 7. Проведено достаточное количество измерений для реализации п.6
 - а) не менее пяти 3 балла
 - б) не менее трёх 2 балла
 - в) одно измерение 1 балл
 8. При обработке экспериментальных данных по п.7 получено значение α в пределах
 - а) $(3,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-4} \frac{\text{моль}}{\text{Па} \cdot \text{м}^3}$ 3 балла
 - б) $(3,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-4} \frac{\text{моль}}{\text{Па} \cdot \text{м}^3}$ 2 балла
 - в) $(3,5 \pm 2,0) \cdot 10^{-4} \frac{\text{моль}}{\text{Па} \cdot \text{м}^3}$ 1 балл
 9. Проведена разумная оценка погрешности определения α 0,5 балла

Требования к оборудованию:

- 1) Бутылки с газированной водой: две бутылки с минеральной **газированной** водой, объёмом 0,5 литра, не вскрытые. Выдаются участникам при комнатной температуре. Также важно обеспечить минимальное взбалтывание воды. В идеале надо расставить её на рабочих местах с вечера и дать отстояться до начала тура. Хорошие результаты получаются с «Аква минерале», но подойдёт и любая другая вода без сахара. Необходимо проверить, что размеры пустой бутылки позволяют поместить внутрь шприц с полностью выдвинутым поршнем. **Этикетки с бутылок необходимо удалить!!! 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 состояние. Также поршень не должен пропускать воздух, если давление внутри шприца больше или меньше атмосферного примерно в 3 раза. Шприц выдаётся без иглы. На корпусе шприца должны быть нанесены хорошо читающиеся деления. **ВАЖНО!!!** Упоры для пальцев на корпусе шприца необходимо аккуратно обрезать острым ножом так, чтобы шприц с выдвинутым поршнем (без иглы!) полностью помещался внутрь пустой бутылки. **Допускается повторное использование шприца, но лучше иметь запас на случай порчи оборудования предыдущим участником.**
- 3) Заглушка на шприц. Изготавливается из иглы, идущей в комплекте. Нужно отломить металлическую иголку от пластмассового основания (канюли) и загерметизировать канюлю. Для герметизации можно затолкать и уплотнить с помощью зубочистки или спички небольшое количество пластилина или жевательной резинки. Подготовленная таким образом канюля должна плотно надеваться на носик шприца. **ВАЖНО!!!** Проверьте герметичность заглушки при давлениях внутри шприца от $3P_{\text{атм}}$, так как герметичность принципиальна в этой задаче. **Допускается повторное использование затычки, но лучше иметь запас на случай порчи оборудования предыдущим участником.**
- 4) Одноразовые стакан, нож и тарелка. Подойдут любые из наборов пластмассовой посуды, продающихся в магазинах. Однако, тарелки лучше выбрать большого размера. Стакан и тарелка используются для поддержания рабочего места в чистоте, нож – для удаления этикетки с бутылок.
- 5) Салфетки. Лучше использовать бумажные салфетки в рулоне. Каждому участнику выдаётся 3-4 салфетки для поддержания рабочего места в чистоте. Необходимо иметь достаточный запас салфеток у дежурных по аудитории (примерно, рулон на 10 человек).