

Задание 11.1. «Газировка (II)». 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)

$$\nu = \alpha V p.$$

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 установится равновесное состояние (10 минут – полное установление, 1 минута – установление с наблюдаемой точностью), 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, $\nu_0 = \alpha V_{\text{в}} p$, где $V_{\text{в}}$ – объём воды, набранной в шприц, ν_0 – количество растворённого в ней газа, p_0 – давление газа в бутылке.

После установления равновесия в воде в растворённом виде находится $\nu_{\text{в}} = \alpha V_{\text{в}} p_0$ моль

газа, в газовой фазе $\nu_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma} p_0}{RT}$. Приравнявая $\nu_0 = \nu_{\text{в}} + \nu_{\Gamma}$, 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 в бутылке установится равновесное давление p (10 минут – полное установление, 1 минута – установление с наблюдаемой точностью), а объём



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

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 измерений: $V_1 = (20,0 \pm 0,5)$ мл, $V_2 = (8,5 \pm 0,5)$ мл,
 $p = (2,4 \pm 0,2)$ атм.

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

№	V_B , мл	V_G , мл	$\alpha, 10^{-4} \text{ моль} / (\text{Па} \cdot \text{м}^3)$
1	2	1.5	2.15
2	4	3	2.15
3	6	5	2.39
4	7.5	7	2.67
5	9.5	8.5	2.56

Оценка систематической погрешности определения α :

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta V_G}{V_G}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_B}{V_B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(p - p_0)}{(p - p_0)}\right)^2} \approx 0,20.$$

Случайная погрешность для α по данным таблицы: $\Delta \alpha \approx 0,18 \cdot 10^{-4} \text{ моль} / (\text{Па} \cdot \text{м}^3)$

Окончательно $\alpha = (2,4 \pm 0,7) \cdot 10^{-4} \text{ моль} / (\text{Па} \cdot \text{м}^3)$.

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

Отметим, что на самом деле давление в бутылке складывается из парциального давления воздуха и углекислого газа. Поскольку изначальное соотношение их в открытой бутылке над поверхностью воды неизвестно, то для того, чтобы корректно рассчитать парциальное давление углекислого газа в бутылке, соответствующее установившейся концентрации растворенного газа, необходимо сделать следующую процедуру измерения давления. Немного отлить из бутылки воду, поместить в нее заткнутый затычкой шприц с объемом воздуха в 20 мл, нажать на бутылку, выгнав практически весь газ из нее, и закрыть бутылку. После этого необходимо потрясти бутылку. Оставшийся в бутылке газ сильно расширится, так как бутылка примет несжатую форму, и тогда парциальным давлением воздуха в конечном состоянии можно будет пренебречь. Поршень шприца при этом смещается на отметку 9.5-10 мл, что соответствует давлению в 2.0-2.1 атмосфер. В этом случае, получаемое значение константы растворимости будет ближе к табличному.