

Растворимость углекислого газа в воде

Рекомендации по выполнению эксперимента.

В предложенном эксперименте есть два длительных упражнения. Для выполнения упражнения 1.5 и упражнения 2.1 в сумме может потребоваться более трех часов. Учтите данный факт при распределении времени и обязанностей участников во время выполнения эксперимента.

Часть 1. Реперные точки.

Упражнение 1.1. Измерение сжимаемости газа.

Прикрепите с помощью скотча длинную ПВХ трубку в распрямленном состоянии к столу. Рядом с трубкой прикрепите мерную ленту (см. Рис. 1).

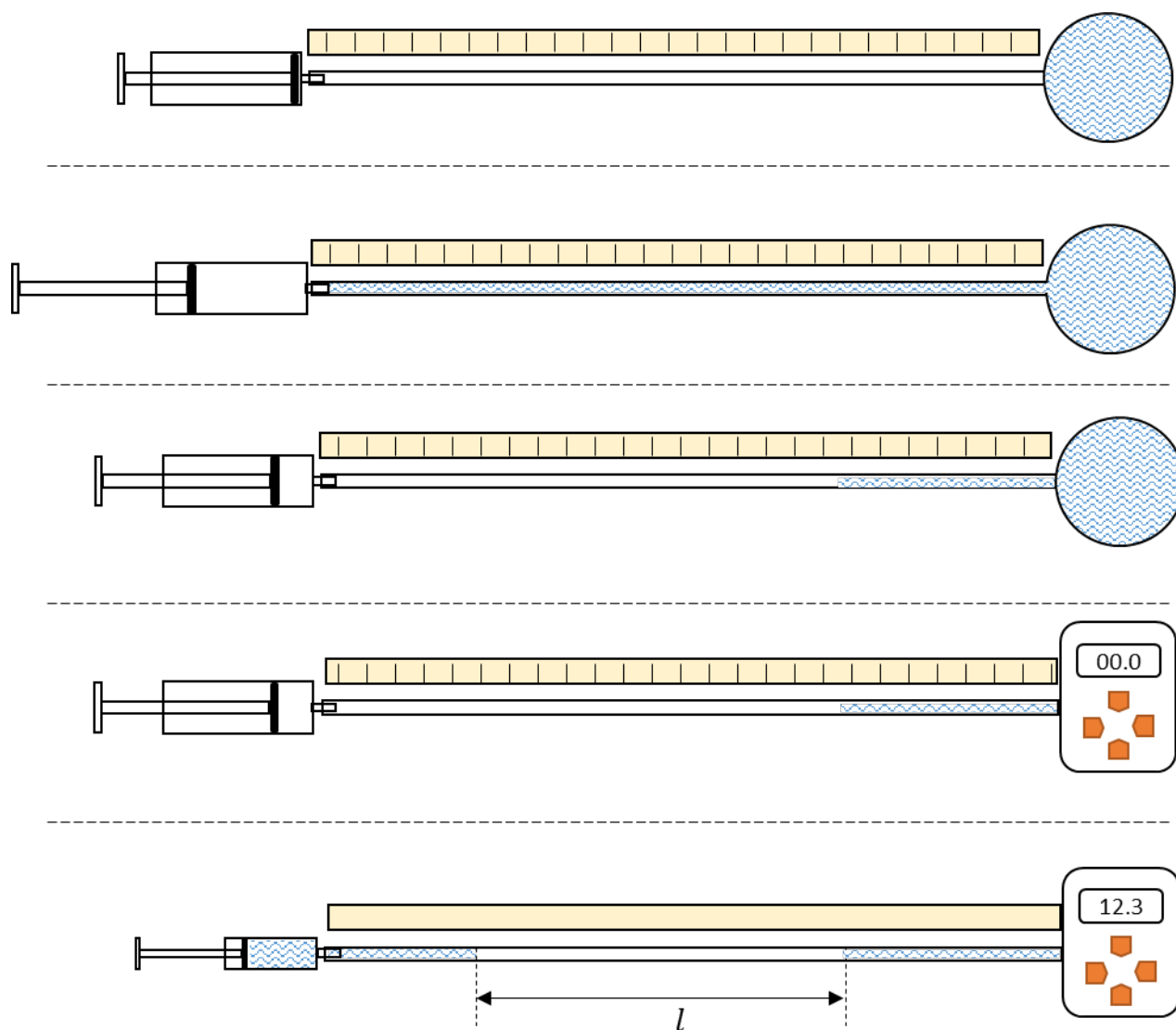


Рис. 1. Подготовка установки для измерения зависимости длины l столба воздуха в трубке от дополнительного давления.

С помощью шприца объемом 20 мл полностью наполните трубку водой, опустив свободный конец трубки в бокс с холодной водой. После этого выдавите из трубки часть воды так, чтобы полностью заполненной оказалась только часть трубки – вблизи одного из ее концов. Этот конец трубки подсоедините к манометру. Отсоедините от трубки шприц объемом 20 мл. Наберите в шприц объемом 5 мл воду и присоедините его на прежнее место большого шприца – к другому концу трубки, вблизи которого нет воды. Нажмите на поршень шприца, создав тем самым дополнительное давление в трубке. Экспериментально получите зависимость длины столба воздуха l внутри трубки от дополнительного давления Δp в ней. Результаты измерений занесите в таблицу. Получите не менее 7 экспериментальных точек во всем возможном диапазоне давлений.

Несколькими словами на английском (или русском) языке или при помощи рисунка с обозначениями поясните основную причину, по которой ближняя к манометру граница столбика воды движется при изменении давления. Обратите при этом внимание на описание манометра.

Упражнение 1.2. Измерение коэффициента расширения пластиковой трубки.

Измерьте с помощью шприца объемом 20 мл внутренний объем трубки v_0 . Измерьте также ее длину L . Рассчитайте площадь поперечного сечения канала трубки s_0 .

При создании дополнительного давления внутри пластиковой трубки площадь поперечного сечения канала трубки изменяется. Предложите способ, которым можно достоверно измерить зависимость относительного изменения площади поперечного сечения канала трубки $\Delta s / s_0$ от дополнительного давления Δp в ней. Поясните предложенный Вами способ с помощью рисунков, аналогичных изображенным на Рис. 1; все обозначения на рисунках подпишите. Измерьте эту зависимость, получив не менее 7 экспериментальных точек во всем возможном диапазоне положительных дополнительных давлений в трубке. Постройте график полученной зависимости. Рассчитайте угловой коэффициент графика.

Упражнение 1.3. Закон Бойля–Мариотта.

В соответствии с законом Бойля–Мариотта дополнительное давление Δp внутри трубки связано с объемом V воздуха в ней:

$$p_0 V_0 = (p_0 + \Delta p) V, \quad (1)$$

где V_0 – начальный объем газа внутри трубки, p_0 – некоторая константа.

Пользуясь результатами проведенных ранее измерений, рассчитайте зависимость Δp от V_0/V и постройте ее график. Определите угловой коэффициент графика и его смещение. Найдите по полученным данным величину p_0 . Не забудьте учесть начальное дополнительное давление внутри трубки, которое появляется после того, как в нее вставляется шприц объемом 5 мл.

Упражнение 1.4. Сравнение с атмосферным давлением.

Сравните полученное в упражнении 1.3. значение p_0 с атмосферным давлением p_a , написанным в классе на доске. Совпадают ли эти величины? Должна ли совпадать точно измеренная величина p_0 со значением атмосферного давления? Если вы считаете, что совпадения быть не должно, поясните причину своего выбора несколькими словами на английском или русском языке.

Упражнение 1.5. Отклонение от закона Бойля-Мариотта.

Газированная вода – это вода, в которой растворен углекислый газ CO_2 . Если такой водой частично заполнена герметично закрытая бутылка, то над поверхностью воды всегда есть газовая фаза CO_2 – углекислый газ, который может быть смешан с воздухом и (или) насыщенным водяным паром. В стационарном состоянии скорость выхода углекислого газа из воды будет равна скорости входа углекислого газа из газовой фазы в воду. При этом концентрации углекислого газа как в воде, так и в газовой фазе, меняться не будут, а вместе с ними не будет меняться и парциальное давление углекислого газа в газовой фазе.

Количество растворенного в воде газа в стационарных условиях пропорционально парциальному давлению углекислого газа над водой и объему воды. Можно записать для количества молей растворенного в воде газа в стационарных условиях:

$$v_w = \frac{\alpha p V_w}{RT_0} \quad (2)$$

где p – равновесное парциальное давление углекислого газа над водой, V_w – объем воды, R – универсальная газовая постоянная, $T_0 = 273,15$ К – температура, соответствующая нулю градусов по шкале Цельсия. Величину α будем называть растворимостью углекислого газа в воде.

Если по каким-то причинам количество растворенного в воде газа превышает равновесное значение, даваемое формулой (2), то скорость выхода газа из воды будет превышать скорость растворения газа в воде. Количество растворенного в воде газа при этом будет уменьшаться, а парциальное давление углекислого газа

над водой будет увеличиваться. Этот процесс будет происходить до тех пор, пока парциальное давление углекислого газа над водой и количество газа, растворенного в воде, не станет связано соотношением (2). После этого установится равновесное состояние.

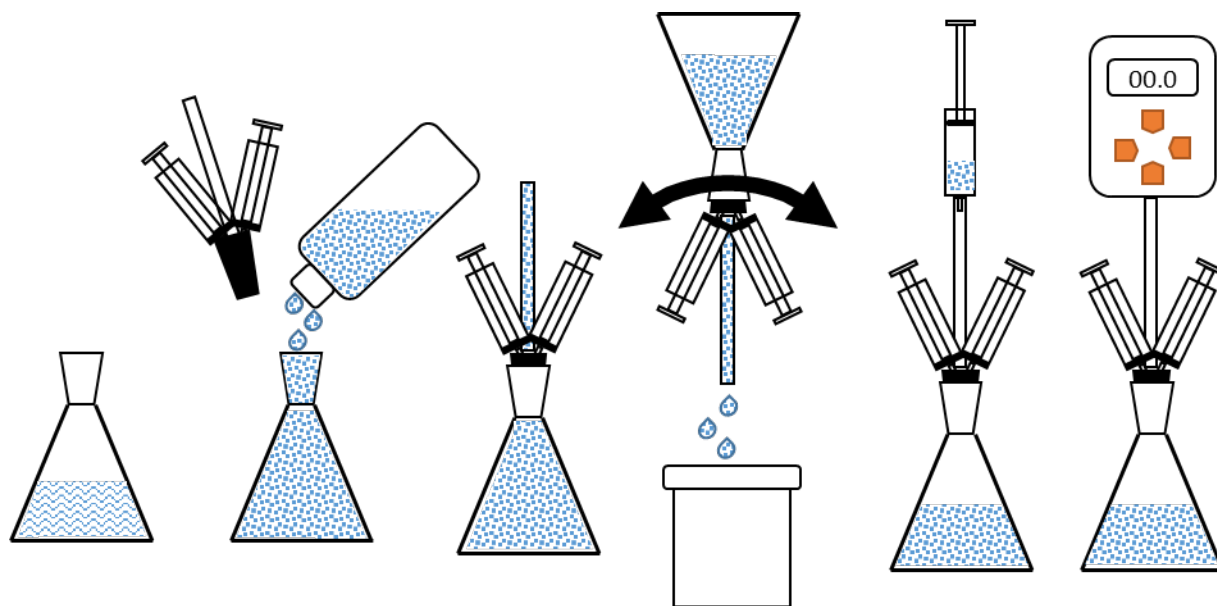


Рис. 2. Подготовка установки для измерения растворимости углекислого газа в воде.

Измерьте объем одной из колб с вставленной в нее пробкой. Измерьте объем трубки, служащей для соединения колбы и манометра. Внутренний объем одного входа манометра составляет примерно 0,5 мл.

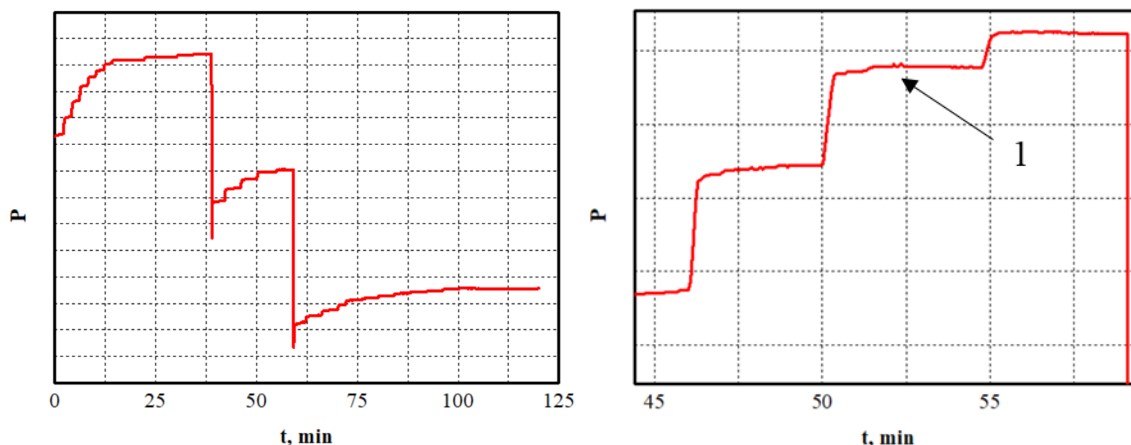
Налейте в эту колбу 10 мл обычной воды (Рис. 2). Долейте в колбу газированную воду из бутылки так, чтобы в колбе не осталось воздуха. Заткните колбу пробкой со вставленными в нее шприцами и трубкой для соединения с манометром. Переверните колбу и потрясите ее, направив трубку в бокс с водой. Вода начнет выливаться через трубку. Если вода начнет попадать в шприцы, вставленные в пробку, надавите на их поршни, чтобы вернуть воду обратно в колбу. Таким способом вылейте из колбы столько смеси газированной воды и обычной воды, чтобы в колбе осталось примерно 40–50 мл жидкости. Пережмите трубку пластиковым зажимом, надетым на трубку. Затем подсоедините к трубке еще один шприц объемом 20 мл, и после этого откройте зажим. Выдвиньте поршень шприца, подсоединенного через трубку к колбе, на отметку «10 мл», тем самым отсосав из трубки оставшуюся в ней воду и небольшую часть углекислого газа из колбы. Опять пережмите соединительную трубку пластиковым зажимом, отсоедините шприц и подсоедините трубку к манометру. Верните зажим в открытое состояние. Теперь в вашем распоряжении есть колба с газированной водой, над поверхностью которой практически нет воздуха.

Долейте в бокс с водой некоторое количество горячей воды из водяной бани, чтобы температура воды в боксе оказалась близкой к комнатной температуре. Погрузите колбу в воду, налитую в бокс, и закрепите колбу с помощью штатива так, чтобы она касалась дна бокса и была почти полностью погружена в воду. Оставьте колбу в воде на 5 минут, чтобы установилось термодинамическое равновесие между содержимым колбы и водой в боксе.

В этом эксперименте необходимо будет измерять равновесное давление углекислого газа над водой. Время установления равновесного состояния может составлять несколько десятков часов. Для ускорения процесса установления равновесного состояния можно немного взболтать воду в колбе. При этом скорость выхода углекислого газа из воды повысится и за время взбалтывания парциальное давление вырастет гораздо сильнее, чем если бы в это время колба оставалась в покое. Однако за время взбалтывания парциальное давление углекислого газа может возрасти слишком сильно, превысив равновесное давление. Поэтому будем взбалтывать воду в колбе в течение 15 с, чтобы повышать давление не слишком сильно и не «проскочить» давление равновесия. После взбалтывания вода в колбе будет двигаться еще в течение 2-3 минут, то есть не будет находиться в стационарном состоянии. Поэтому после взбалтывания будем выжидать более 3 минут, чтобы после остановки движения воды в колбе можно было наблюдать, будет ли повышаться или понижаться давление в колбе. Время ожидания выберем равным 4 мин 45 с, чтобы полный цикл взбалтывания и ожидания составлял 5 минут. Если давление в колбе в последние минуты ожидания повышается, то это означает, что давление газа все еще ниже равновесного, и из воды вышло недостаточно газа. Тогда колбу необходимо взболтать еще раз. Если в последние минуты ожидания давление в колбе не меняется, то это означает, что давление близко к равновесному. Если давление в колбе в последние минуты ожидания понижается, то это означает, что давление выше равновесного и мы «проскочили» равновесное давление.

Открепите колбу от штатива. Аккуратно помешайте воду в колбе в течение 15 с взбалтывающими вращательными движениями, так чтобы большая часть колбы оставалась погруженной в воду. Поставьте колбу обратно на дно бокса, и опять закрепите ее в погруженном положении с помощью штатива. Подождите 4 минуты 45 с, затем повторите все операции снова. Проследите за давлением в последние 2 минуты ожидания. Если давление в колбе растет, перемешайте воду в колбе еще раз и опять выждите 4 минуты 45 с. Продолжайте такой циклический эксперимент до тех пор, пока не увидите, что давление в последние 2 минуты ожидания перестало меняться. После этого перемешайте воду в колбе еще один раз, чтобы удостовериться в том, что давление в процессе последних двух минут ожидания начнет понижаться. **Запишите показания манометра, соответствующие давлению равновесия (см. Рис. 3) в колбе.**

Выдвиньте поршень первого шприца на отметку «20 мл» и зафиксируйте его с помощью иголки (см. описание оборудования); повторите эксперимент с перемешиванием воды в колбе. **Запишите новое давление равновесия.** Выдвиньте и закрепите поршень второго шприца также на отметку «20 мл» и еще раз повторите эксперимент.



**Рис. 3. Характерный вид графика зависимости давления в колбе от времени.
1 – давление равновесия.**

Обращаем ваше внимание на то, что за счет диффузионных процессов количество углекислого газа в колбе всегда немного убывает. То есть в полученном состоянии равновесия на самом деле скорость выхода газа из жидкости уравнивает сумму скоростей растворения молекул газа в жидкости и скорость диффузионного истекания молекул из колбы. Однако будем считать, что полученные давления удовлетворяют соотношению (2).

Упражнение 1.6. Расчет растворимости углекислого газа при комнатной температуре.

Запишите выражение для общего количества молей углекислого газа в колбе, как суммы количества молей в газовой фазе и в растворенном состоянии. Используйте для этого следующие обозначения: V_w – объем воды в колбе, V – объем газовой фазы, p – равновесное парциальное давление углекислого газа над водой, T – температура воды и газа в колбе, $T_0 = 273,15$ К, R – универсальная газовая постоянная, α – растворимость углекислого газа в воде.

Будем считать, что в течение эксперимента общее количество молей углекислого газа в колбе неизменно.

Давление, измеряемое манометром при открытом отрицательном входе манометра, – это разность давления в колбе и атмосферного давления p_a . Запишите формулу, которая выражает значение парциального давления углекислого газа p

в колбе через показания манометра Δp . При выводе формулы вспомните, из чего состоит газовая фаза. Рассчитайте зависимость произведения pV (равновесного давления углекислого газа в колбе и объема его газовой фазы) от равновесного давления углекислого газа p .

Постройте график рассчитанной зависимости $pV(p)$. Рассчитайте его угловой коэффициент.

Запишите температуру воды в боксе в процессе измерений. Выньте пробку из колбы. Измерьте объем воды в колбе, используя электронные весы (считайте плотность воды равной 1 г/см^3). Рассчитайте по угловому коэффициенту графика и полученным величинам температуры воды в боксе и объема воды в колбе растворимость углекислого газа. Оцените погрешность ваших измерений.

Часть 2. Зависимость растворимости от температуры.

Упражнение 2.1. Измерение зависимости давления во влажной колбе от температуры.

Налейте в одну из колб 30 мл простой воды. Заткните колбу пробкой с термометром. Поместите колбу в воду комнатной температуры. Подождите несколько минут и подсоедините к колбе манометр. Дождитесь того момента, когда давление в колбе перестанет меняться. Запишите показания манометра и температуру воды в боксе. Перенесите колбу в водяную баню. Полностью погрузите колбу в нагретую воду, поставив ее внутрь металлического цилиндра с отверстиями, и закрепите с помощью штатива. Дождитесь установления теплового равновесия и запишите давление в колбе и температуру воды в водяной бане.

Упражнение 2.2. Давление паров воды в зависимости от температуры.

Рассчитайте по полученным данным и результатам предыдущих экспериментов изменение давления паров в колбе Δp_w при ее переносе из бокса в водяную баню. Запишите основные формулы, которые Вы используете для вычисления.

Упражнение 2.3. Измерение зависимости давления в колбе с газированной водой от температуры.

Если в этом упражнении вы будете использовать колбу, отличную от той, которую использовали в упражнении 1.5. – измерьте ее объем. Если будете использовать прежнюю колбу, просто запишите еще раз ее объем в лист ответов.

Используйте в этом упражнении новую еще не открытую бутылку с газированной водой.

Заполните колбу смесью обычной и газированной воды, используя при этом пробку с термометром. Применяйте для этого способ, описанный в упражнении 1.5., но со следующим небольшим отличием. При удалении воды из трубки передвиньте поршень шприца на отметку 20 мл для того, чтобы понизить начальное давление в колбе сильнее, чем в упражнении 1.5.

Поместите колбу в бокс с водой комнатной температуры. Проведите несколько раз цикл перемешивания и ожидания, чтобы добиться равновесного состояния газа и воды в колбе. Запишите показания манометра соответствующие давлению равновесия при комнатной температуре.

Поместите колбу в водяную баню, поставив ее внутрь металлического цилиндра с отверстиями (этот цилиндр предотвратит расплескивание воды из бани во время перемешивания воды в колбе). Проведите эксперимент, аналогичный эксперименту при комнатной температуре. Давление равновесия при высокой температуре измеряется не точно, так как баня периодически включает и выключает нагреватель. Постарайтесь сделать наилучшую оценку давления равновесия (показаний манометра, соответствующим давлению равновесия). После завершения измерений давления в колбе, помещенной в водяную баню, измерьте объем газированной воды внутри колбы.

Упражнение 2.4. Давление углекислого газа в зависимости от температуры.

Рассчитайте на основе полученных в предыдущих упражнениях данных парциальное давление углекислого газа при комнатной температуре и при температуре водяной бани. Запишите основные формулы, которые вы использовали для расчета.

Упражнение 2.5. Зависимость растворимости от температуры.

Взяв за опорную точку растворимость углекислого газа при комнатной температуре, рассчитайте по полученным данным растворимость углекислого газа при температуре водяной бани. Запишите основные формулы, которые вы использовали для расчета. Увеличивается или уменьшается растворимость углекислого газа с повышением температуры?