

Работа 7

ИЗУЧЕНИЕ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ

Цель работы: проведение физического эксперимента, и более глубокое понимание процессов молекулярной физики.

Задача: определение давления и массы насыщенных паров этанола (этилового спирта C_2H_5OH). Расчет динамических величин, связанных с процессами испарения и конденсации молекул спирта.

Введение

Что будет, если сосуд с жидкостью герметично закрыть? Жидкость испаряется. Плотность пара над поверхностью жидкости и концентрации молекул начнет увеличиваться. Поэтому, все больше будет возвращаться молекул пара в жидкость. Начнет увеличиваться скорость конденсации.

В какой-то момент скорость конденсации окажется равна скорости испарения. Наступит динамическое равновесие между жидкостью и паром. За единицу времени из жидкости будет вылетать столько же молекул, сколько возвращаться в нее из пара. С этого момента, количество жидкости перестанет убывать, а количество пара – увеличиваться. Пар достигнет «насыщения».

Насыщенный пар – это пар, который находится в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью.

Давление P и плотность насыщенного пара это максимальные давление и плотность, которые может иметь пар при данной температуре.

Состояние насыщенного пара можно приближенно описывать уравнением состояния идеального газа (уравнением Менделеева-Клапейрона) :

$$P_H V = \frac{m}{M} RT, \quad (7.1)$$

где P_H – давление насыщенного пара; V – объем, занимаемый паром; m – масса, перешедшая из жидкости в пар; M - молярная масса вещества; T - температура пара.

По своим свойствам насыщенный пар отличается от идеального газа.

1. При постоянной температуре плотность насыщенного пара не зависит от его объема.
2. Давление насыщенного пара не зависит от его объема.

3. При постоянном объеме плотность насыщенного пара растет с повышением температуры и уменьшается с понижением.

4. Давление насыщенного пара растет с температурой быстрее, чем по линейному закону.

Методика выполнения работы

Измерения делают с этиловым спиртом (этанол C_2H_5OH). Схема установки приведена на рисунке 7. 1.

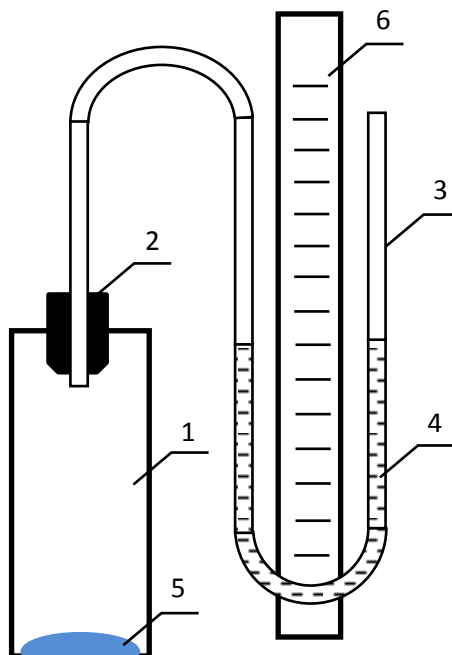


Рис. 7.1. 1-емкость (колба), 2-пробка, 3- прозрачная трубка, 4-вода, 5-этиловый спирт, 6-линейка.

Емкость 1 должна быть чистой и сухой. Внутри емкости вводится несколько капель спирта 5 и сразу закрывается пробка 2. Внутри емкости начинается процесс испарения и увеличивается давление паров спирта.

Избыточное давление пара внутри емкости измеряется жидкостным манометром. Он состоит из трубки 3 и жидкости (вода) 4. Избыточное давление соответствует гидростатическому давлению столба поднятой жидкости в трубке и определяется по формуле

$$p = \rho g \cdot 2h, \quad (7.2)$$

где ρ – плотность жидкости в трубке, h - высота, на сколько поднимается уровень жидкости в одной половине трубки. Так как во второй половинке вода опускается, перед h ставится коэффициент двойка.

Измерив P_H, V, T , можно определить массу спирта перешедшего в пар.

Порядок выполнения работы

Задание 1.

1. Подготовьте таблицу 7.1 для записи результатов измерений.
2. Выполняют работу не менее 2-х студентов. Один замеряет время по секундомеру и записывает в таблицу высоту столба воды. Другой замеряет высоту столба воды в трубке 3 по линейке 6 и говорит показания первому студенту.
3. Капля спирта (1см^3) наливается в колбу. *Сразу* закрывается пробка и включается секундомер. Секундомер не останавливать.
4. Первую минуту высота уровня воды замеряется через каждые пять секунд. Вторую и третью минуты измерения высоты уровня производятся через каждые 10 секунд. Данные заносятся в таблицу.
5. Если какое-то измерение сделать не успели, клетку оставляют незаполненной и переходят к следующему замеру.
6. Через 8-10 минут, когда высота столбика воды перестанет меняться. Это состояние газа соответствует насыщенному пару, а значение давления соответствует давлению насыщенного пара. Запишите конечное значение.

Таблица 7.1. Зависимость высоты водяного столба (давления паров этанола) от времени

t, с																							
h, см																							

7. По формуле (7.2), определить максимальное давление паров этанола в емкости. Эта величина соответствует давлению насыщенных паров спирта при комнатной температуре.
8. По формуле (7.1) определить массу спирта m , перешедшего из жидкого состояния в насыщенные пары. Комнатная температура принимается 27°C . Молярная масса рассчитывается по химической формуле $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$. Объем колбы записан на лабораторной установке.
9. Оцените относительную и абсолютную погрешности давления и массы.

Задание 2.

Для выполнения задания 2 внимательно прочитайте **приложение** (в конце работы).

1. По данным таблицы 7.1 постройте график зависимости высоты водяного столба h от времени t (рис.7.3). Этот график соответствует зависимости давления пара ($p_{\text{пар}}$) от времени.

2. Постоянная времени τ определяется из графика. Проводится касательная к графику из начала координат. Точка пересечения касательной с линией значения давления насыщенного пара $P_{\text{нп}}$ дает величину τ .

3. Значение v_x (средней проекции скорости молекул в газовой фазе при данной температуре) определяется по функции распределения Максвелла молекул по скоростям. Ее значение рассчитывается по формуле

$$V_x = \sqrt{\frac{2kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\pi \mu}}$$

где R —универсальная газовая постоянная, μ - молярная масса спирта.

4. По формуле (7.5) определите q – вероятность, с которой атом, подлетевший к поверхности жидкости из газовой фазы, может вернуться обратно в жидкость.

5. Оцените диаметр d молекулы спирта. Считайте, что они плотно прижаты друг к другу. Плотность спирта (790 кг/м^3). Определите поверхностную концентрацию молекул N_0 по формуле $1/d^2$.

6. По формуле (7.4) рассчитайте величину f . Значение q определено в пункте 4. Концентрация молекул насыщенного пара $n_{\text{нас.пар}}$ определяется через давление из формулы $p_{\text{нас.пар}} = n_{\text{нас.пар}} kT$, где k –постоянная Больцмана.

7. Оцените относительную и абсолютную погрешности коэффициентов f и q .

8. Напишите заключение к работе.

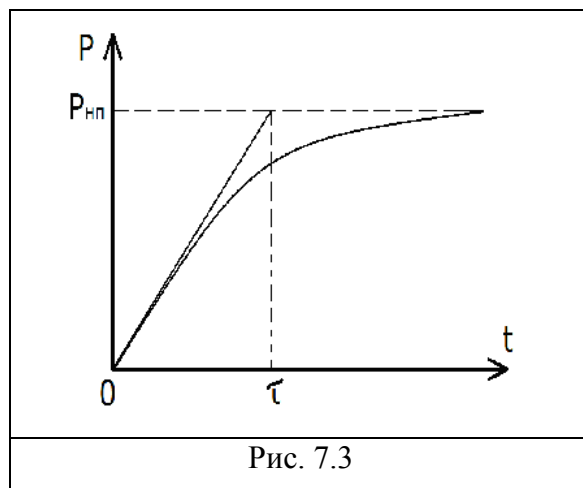


Рис. 7.3

Контрольные вопросы.

1. Что такое насыщенный пар?
2. При какой из двух температур давление насыщенных паров одного вещества будет больше, $T_1 > T_2$

3. От каких параметров системы может зависеть скорость установления динамического равновесия между жидкостью и паром.
4. Что означает, если величина f – вероятность вылета атома спирта с поверхности жидкости за 1 секунду, получается больше 1?

Вопросы техники безопасности при выполнении работы.

При выполнении работы используется емкость объемом 530 см^3 и высотой $H=15\text{см}$. Чтобы достичь насыщенных паров в таком объеме требуется менее одного миллилитра спирта. Поэтому выдается пластиковая бутылочка с количеством спирта меньшим, чем в лабораторной спиртовой горелке. Это исключает пожароопасную ситуацию. После того, как в колбу из бутылочки наливается несколько капель спирта, обе емкости закрываются. Поэтому запаха паров спирта в лаборатории практически нет.

Литература.

1. И.В.Савельев. Курс физики. Том 1. Механика. Молекулярная физика. М. «Наука», 1989.
2. Физические величины. А.П.Бабичев, Н.А.Бабушкина, А.М.Братковский, Под редакцией И.С. Григорьева, Е.З.Мейлихова, Справочник, М. Энергоатомиздат, 1991.
3. А.И. Бурштейн. Молекулярная физика. из-во «Наука», Сибирское отделение, 1986

Приложение

Смоделируем процесс установления динамического равновесия между жидкостью и паром в закрытом сосуде. На рисунке 7.2 изображён сосуд с жидкостью на дне, с поверхности которой происходит испарение. Введём обозначения физических величин:

H , [м] – высота сосуда, в котором находятся пары;

S – площадь основания сосуда;

N_0 , [м⁻²] – количество молекул, приходящихся на единицу поверхности жидкой фазы (поверхностная концентрация молекул спирта);

$n_{\text{пар}}$, [м⁻³] – концентрация испарившихся молекул и находящихся в газовой фазе; меняется от 0 до $n_{\text{нас}}$ (концентрация молекул в насыщенном паре).

Введём величину, характеризующую процесс испарения жидкости. f – доля вылетевших молекул с поверхности жидкости за промежуток времени 1 секунда. Тогда количество молекул, которые улетят с поверхности S жидкости за малый промежуток времени dt , равно $N_0 \cdot S \cdot f \cdot dt$.

q – вероятность, с которой молекула, подлетевшая к поверхности жидкости из газовой фазы, вернётся обратно в жидкость.

Тогда за время dt вернётся $n_{\text{пар}} \cdot S \cdot v_x \cdot q \cdot dt$ молекул, где v_x – средняя проекция скорости (в положительном направлении) молекул в газовой фазе при данной температуре. (Рассчитывается преподавателем из распределения Максвелла молекул по скоростям [2]).

За малый промежуток времени dt количество молекул, находящихся в газовой фазе, изменится на величину $dn_{\text{пар}} S H$;

$dn_{\text{пар}}$ приращение концентрации молекул в газовой фазе за время dt .

Тогда уравнение динамики испарения и конденсации молекул жидкости будет выглядеть следующим образом:

$$dn_{\text{пар}} S \cdot H = N_0 \cdot S \cdot f \cdot dt - n_{\text{пар}} \cdot S \cdot v_x \cdot q \cdot dt$$

Разделим данное уравнение на $S \cdot v_x \cdot q$

$$\frac{H}{v_x \cdot q} \cdot dn_{\text{пар}} = \frac{N_0 \cdot f}{v_x \cdot q} \cdot dt - n_{\text{пар}} \cdot dt$$

группируем,

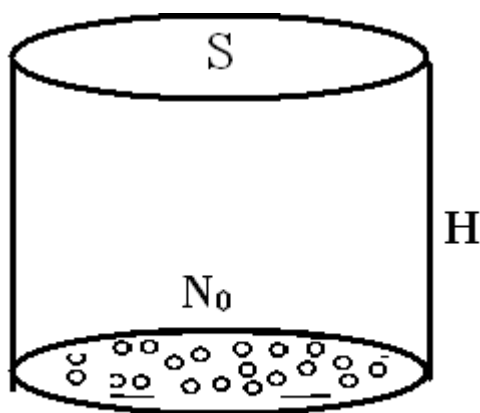


Рис. 7.2

$$\frac{H}{V_x \cdot q} \cdot d\left(\frac{N_0 \cdot f}{V_x \cdot q} - n_{\text{пар}}\right) = -\left(\frac{N_0 \cdot f}{V_x \cdot q} - n_{\text{пар}}\right) \cdot dt$$

разделяем переменные, и составляем дифференциальное уравнение:

$$\frac{H}{V_x \cdot q} \cdot \frac{d\left(\frac{N_0 \cdot f}{V_x \cdot q} - n_{\text{пар}}\right)}{\left(\frac{N_0 \cdot f}{V_x \cdot q} - n_{\text{пар}}\right)} = -dt$$

и после интегрирования получим:

$$\frac{H}{V_x \cdot q} \cdot \ln\left(\frac{N_0 \cdot f}{V_x \cdot q} - n_{\text{пар}}\right) = -t + C$$

С учётом начального условия: $n_{\text{пар}} = 0$ при $t = 0$ – определяем константу C :

$$\frac{H}{V_x \cdot q} \cdot \ln\left(\frac{N_0 \cdot f}{V_x \cdot q} - 0\right) = 0 + C$$

или

$$\exp\left(C \cdot \frac{V_x \cdot q}{H}\right) = \frac{N_0 \cdot f}{V_x \cdot q}$$

В итоге получаем зависимость концентрации молекул в газовой фазе от времени:

$$n_{\text{пар}} = \frac{N_0 \cdot f}{V_x \cdot q} \left(1 - \exp\left(-\frac{V_x \cdot q \cdot t}{H}\right)\right) \quad (7.3)$$

Видно, что зависимость имеет экспоненциальный характер.

Через достаточно большой промежуток времени ($t \rightarrow \infty$) наступит насыщение паров. Концентрация молекул будет соответствовать концентрации насыщенного пара $n_{\text{пар}} \rightarrow n_{\text{нас.пар}}$,

$$n_{\text{нас.пар}} = \frac{N_0 \cdot f}{V_x \cdot q} \quad (7.4)$$

Коэффициент при t в показателе экспоненты в формуле (7.3) обычно называют постоянной времени τ ,

$$\frac{V_x \cdot q}{H} = \frac{1}{\tau} \quad (7.5)$$

Построив зависимость $n_{\text{пар}}$ от времени t , можно определить постоянную времени τ . По формуле (7.5) можно найти значение коэффициента q .

Концентрация насыщенного пара $n_{\text{нас.пар}}$ определяется через давление из формулы $p_{\text{нас.пар}} = n_{\text{нас.пар}} kT$, где k – постоянная Больцмана. Определить значение коэффициента f можно по формуле (7.4).

Смысл коэффициентов заключается в следующем. q показывает, какая доля молекул спирта возвращается обратно в жидкость, подлетая к её поверхности из газовой фазы. Коэффициент f получается больше единицы. На первый взгляд это выглядит странным. Но смысл этой величины в том, что она показывает, сколько за одну секунду испаряется *мономолекулярных слоёв* спирта.

Жидкое состояние в теории физики описывается сложной моделью свободного объема молекул. В данной работе процесс испарения и конденсации описывается двумя константами. Такая модель доступна для понимания процесса.