

## Лабораторная работа

### Определение удельной теплоты парообразования воды

**Цель работы:** 1) измерение зависимости давления насыщенного пара воды от температуры; 2) вычисление по полученным данным теплоты парообразования с помощью уравнения Клапейрона-Клаузиуса.

**В работе используются:** шприц на 20 мл и электронный термометр, закреплённые на пластиковой крышке, стеклянная литровая банка, горячая ( $\sim 100$  °С) вода, лёд, линейка. Салфетки для поддержания чистоты на рабочем месте.

В настоящей работе исследуется зависимость давления насыщенного пара воды от температуры. Давление пара очень «сильно» зависит от температуры. Для воды эта зависимость достаточно хорошо описывается формулой:

$$p = p_A \cdot \exp\left(\frac{L}{R}\left(\frac{1}{T_{100}} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (1)$$

Здесь  $p_A = 760$  мм. рт. ст – атмосферное давление, равное, как известно, давлению насыщенного пара воды при температуре  $T_{100} = 373$  К ( $= 100$  °С),  $L$  – молярная теплота парообразования,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Эта формула получена из формулы Клапейрона-Клаузиуса при следующих предположениях:

- 1) теплота испарения считается независящей от температуры  $L = const$ ; 2) пренебрегается молярным объёмом жидкости по сравнению с молярным объёмом пара; 3) считается, что пар подчиняется уравнению состояния идеального газа Клапейрона-Менделеева. Естественно, что эти упрощения допустимы, если интервал изменения температуры не слишком широк.

Идея опыта [4], позволяющая с помощью достаточно простого оборудования экспериментально исследовать зависимость  $p(T)$ , заключается в следующем. Если пробирку, которая находится в воздухе, открытым концом погрузить в стакан с горячей водой (см. рис. 1), то, после наступления термодинамического равновесия, в пробирке будет находиться газовая смесь: воздух + насыщенный пар. Полное давление смеси равно, очевидно, атмосферному давлению (гидростатическое давление в нашем опыте можно не учитывать, поскольку высота столба воды не превышает  $\sim 10$  см, а создаваемое им избыточное, по сравнению с атмосферным, давление, не превышает, соответственно, 1 %):

$$p_A = p + p_B = p + \frac{\nu RT}{V},$$

где  $p_B = \frac{\nu RT}{V}$  - парциальное давление  $\nu$  молей воздуха в объёме пробирки  $V$ .

Температурный ход парциальных давлений пара и воздуха существенно разный: давление пара, как указывалось выше, падает с понижением температуры очень быстро, по экспоненте, в то время как давление воздуха изменяется пропорционально абсолютной температуре. В результате, если при температурах  $70 - 95$  °С парциальные давления пара и воздуха сравнимы, то при температурах  $30 - 40$  °С и ниже практически всё давление создаётся воздушной компонентой смеси. Проявляется это в том, что при охлаждении воды в сосуде от температуры  $\sim 90$  °С мы вначале наблюдаем очень резкое уменьшение объёма газовой смеси в пробирке, а начиная с  $\sim 40$  °С «скорость» изменения объёма существенно падает: объём оказывается пропорциональным температуре, что характерно

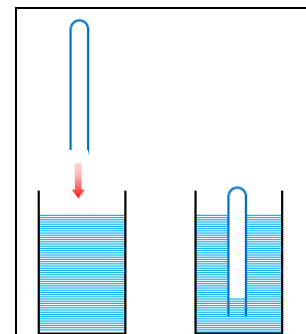


Рис.1

для изобарического процесса идеального газа. Это и означает, что паровая составляющая смеси практически «вымерзла».

Предположим, что вода остыла до минимальной температуры  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  и этой температуре соответствует объём газовой смеси  $V_0$ . Тогда, пренебрегая давлением пара при этой температуре, можно записать:

$$p_A = \frac{\nu RT_0}{V_0},$$

откуда количество воздуха в пробирке:

$$\nu = \frac{p_A V_0}{RT_0}.$$

Теперь, зная  $\nu$ , мы можем рассчитать парциальное давление пара при высоких температурах:

$$p = p_A - p_B = p_A - \frac{\nu RT}{V} = p_A \left(1 - \frac{T}{T_0} \frac{V_0}{V}\right).$$

Относительное давление пара:

$$\frac{p}{p_A} = 1 - \frac{T}{T_0} \frac{V_0}{V} \quad (2)$$

Это и будет нашей «рабочей» формулой для расчета давления пара при температурах выше  $\sim 70 - 75^\circ\text{C}$ .

Перепишем формулу (1) в виде:

$$\ln \frac{p}{p_A} = -\frac{L}{R} \cdot \frac{1}{T} + \frac{L}{R} \cdot \frac{1}{T_{100}} = -\frac{A}{T} + B.$$

Таким образом, логарифм давления насыщенного пара линейно зависит от обратной температуры, а угловой коэффициент  $A$  этой зависимости с молярной теплотой  $L$  парообразования связан формулой:

$$L = AR$$

Удельная теплота парообразования ( $\mu = 18 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$  молярная масса воды):

$$r = \frac{L}{\mu} = \frac{AR}{\mu} \quad (3)$$

**Экспериментальная установка.**

Схема установки показана на рис. 3. В наполненный водой сосуд опущен цилиндр 20-ти мл шприц без иглы. Поршень шприца полностью выдвинут, а его шток закреплён в крышке сосуда. Температура воды измеряется закреплённым в крышке термометром. Термометр имеет возможность перемещаться вверх-вниз и при измерениях устанавливается так, чтобы его чувствительный элемент находился примерно на уровне середины паро-воздушного столба. В крышке имеется небольшое дополнительное отверстие, поскольку она не должна быть герметичной. Перед началом измерений в сосуд заливается «крутой» кипяток ( $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и после установления термодинамического равновесия температура в сосуде оказывается равной  $\sim 90 - 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Дальнейшее изменение температуры происходит в результате естественного охлаждения системы. Для ускорения охлаждения при температурах ниже  $\sim 40-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  в воду можно добавлять кусочки льда. Лёд используется также для того, что охладить систему до температур ниже комнатной.

**Рекомендации по изготовлению и подготовке оборудования к проведению измерений**

В нашей работе в качестве пробирки используется 20-ти мл шприц, который приобретается в аптеке без рецепта. Шток поршня крепится в пластиковой крышке сосуда так, чтобы цилиндр был полностью погружен в воду и при этом не упирался в дно сосуда. Если шкала на цилиндре шприца очень грубая, то можно нанести дополнительные деления, или с помощью скотча наклеить полоску миллиметровки. В качестве сосуда можно использовать обычную литровую банку с пластиковой крышкой. В крышке крепится электронный термометр (можно использовать также терморезисторный термометр мультиметра или обычный спиртовой (ртутный) термометр, рассчитанный на температуры до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Имейте в виду, что крышка сосуда не должна быть герметичной – в ней необходимо сделать дополнительное отверстие. Для ускорения охлаждения, а также для получения температур ниже комнатной используется лёд (небольшие кусочки льда можно бросать в сосуд, аккуратно приподнимая крышку (или в крышке сделать отверстие  $\sim 1\text{ см}$ )). Заранее приготовьте лёд в морозилке холодильника, а сосуд не заливайте под завязку.

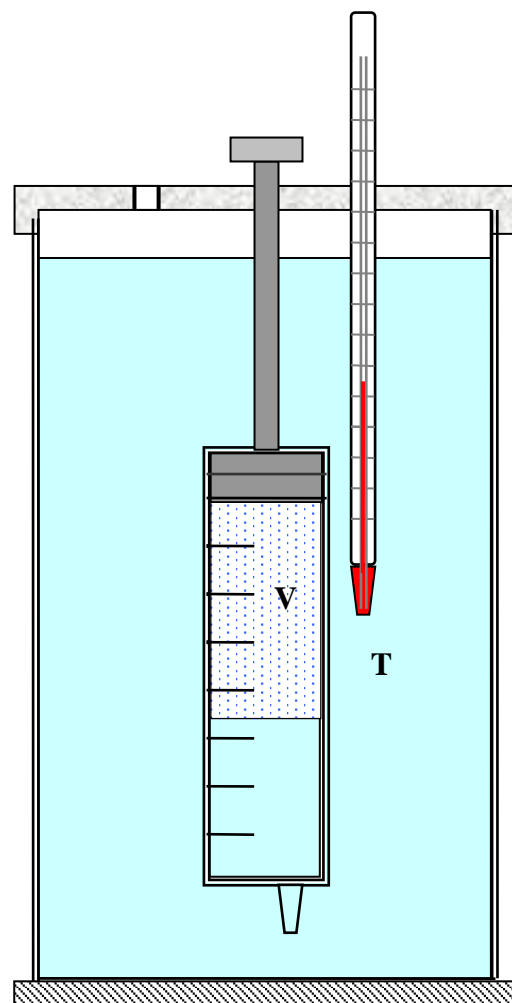


Рис. 2

### Задание

1. Соберите и подготовьте установку (рис. 3) к измерениям.

Для этого:

- Отрегулируйте положение цилиндра шприца и термометра в крышке;
- Залейте в банку кипяток (кипящую воду). (Банку, чтобы она не треснула, рекомендуется перед заливкой предварительно прогреть горячей водой из-под крана).
- Закройте банку крышкой, погрузив в горячую воду цилиндр шприца и термометр;
- Дождитесь, когда воздух в цилиндре прогреется и насытится парами воды, т.е. наступит термодинамическое равновесие: пузырьки воздуха при этом перестанут выделяться из нижнего отверстия цилиндра, а уровень воды в цилиндре установится вблизи нижнего его торца. Паро-воздушная смесь при этом будет занимать практически весь объём цилиндра.
- Показания термометра должны быть  $\sim 90-95$  °С. (Кстати, очень рекомендуется проверить градуировку термометра, опустив его в кипящую воду ( $100$  °С) и в ёмкость с тающим льдом ( $0$  °С))

Установка готова к измерениям.

2. Снимите зависимость  $V(t)$  объёма  $V$  паро-воздушной смеси от её температуры  $t$  по мере естественного остывания системы.
  - Объём  $V$  измеряется по шкале цилиндра;
  - Температура  $t$  измеряется по показаниям термометра, который, вообще говоря, измеряет температуру жидкости в сосуде, но при медленном остывании эту температуру с достаточно хорошей точностью можно считать равной температуре паровоздушной смеси. (Жидкость в сосуде рекомендуется, если это возможно, помешивать самим термометром).  
Измерения необходимо провести в диапазоне от  $\sim 90-95$  °С до комнатной и ниже ( $\sim 15 - 20$  °С) т.е. до температур, при которых с хорошей точностью можно пренебречь давлением насыщенных паров.
  - Проведите те же измерения при повышении температуры. Для этого установку надо подогревать на «водяной бане». При этом система помещается в широкую кастрюлю с водой и подогревается на электроплите.
3. Постройте зависимость  $V(t)$ . Обратите внимание на очень резкое изменение объёма  $V$  в температурном диапазоне  $75 - 90$  °С, и практически линейную зависимость от  $t$  при температурах ниже  $\sim 35$  °С.
4. Используя результаты измерений, по формуле (2) рассчитайте экспериментальные значения относительного давления  $\frac{p}{p_A}$  насыщенного пара в температурном диапазоне  $75 - 90$  °С. (Для расчёта давления насыщенного пара по формуле (2) можно использовать не минимальные значения объёма  $V_0$  и температуры  $T_0$ , а угловой коэффициент линейного участка зависимости  $V(T)$ .)
5. Постройте график зависимости  $\ln \frac{p}{p_A}$  от обратной температуры  $1/T$  при температурах  $t \geq 75$  °С ( $T \geq 348$  К). Согласно теории эта зависимость должна быть линейной и



Рис. 3

иметь вид  $\ln \frac{p}{p_A} = -\frac{A}{T} + B$ . По угловому коэффициенту  $A$  наилучшей прямой, проведённой через экспериментальные точки, по формуле (3) определите удельную теплоту  $r$  парообразования воды. Сравните полученное значение  $r$  табличным.

### Контрольные вопросы

1. Во сколько раз увеличивается объём воды при полном её испарении в результате кипения при  $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$ ?
2. Дайте определение удельной (или молярной) теплоты парообразования жидкости. На что расходуется это тепло при испарении жидкости?
3. Рассчитайте, какая часть теплоты испарения воды при  $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$  расходуется на изменение внутренней энергии. Ответ выразите в %.
4. Как изменяется тепло парообразования при понижении температуры. Зная удельную теплоту парообразования воды при  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , вычислите её значение при комнатной температуре  $t = 20,0\text{ }^\circ\text{C}$ .
5. Чему равна удельная теплота парообразования воды в её критической точке.
6. Напишите уравнение Клапейрона-Клаузиуса, объясните его смысл и смысл всех входящих в это уравнение величин.
7. Получите формулу явной зависимости давления насыщенного пара от температуры (формула (1)). При каких упрощающих предположениях получена эта формула?
8. При каком давлении вода будет кипеть при  $101\text{ }^\circ\text{C}$ . Удельную теплоту испарения воды считайте равной  $r = 2260\text{ Дж/г}$ . Как изменится температура кипения при увеличении давления воздуха на  $1\text{ атм}$ ?
9. При какой температуре кипит вода на одной из вершин Памира на высоте  $h = 7150\text{ м}$ . Температуру воздуха считайте постоянной и равной  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .
10. Как следует изменить давление, чтобы температура плавления льда изменилась на один градус? Тепло плавления льда  $q = 335\text{ Дж/г}$ ; плотность льда  $\rho_{\text{л}} = 0,917\text{ г/см}^3$ ; плотность воды  $\rho_{\text{в}} = 1\text{ г/см}^3$ ? Оцените, на сколько градусов изменяется температура плавления льда под коньками хоккеиста.

### Список литературы

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. - М.: Наука, 1990. §§ 113, 114.
2. Коротков П. Ф. Молекулярная физика и термодинамика. – М.: МФТИ, 2009. С. 158 – 165.
3. Лабораторный практикум по общей физике. Т. 1. Термодинамика и молекулярная физика / под ред. А. Д. Гладуна. – М.: МФТИ. – 2007. С. 225 - 235.
4. XXVI Международная олимпиада «Туймаада». Физика. Экспериментальный тур (методическое пособие) – Якутск, 2019.