

# Давление насыщенных паров воды. Приборы и оборудование

## Условие

### Задание 2. Давление насыщенных паров воды.

**Приборы и оборудование:** Шприц 60 мл, манометр с верхним пределом измерения 300 мм. рт. ст., колба с отводом, пробка резиновая с термометром, штуцер, трубки пластиковые соединительные, барометр (один на кабинет), стакан пластиковый 200 мл, горячая вода.

*Оценка погрешностей в данной работе не требуется.*

В данной работе Вам предоставлен стандартный прибор для изучения газовых законов из комплекта оборудования кабинета физики. Соберите экспериментальную установку: плотно закройте колбу пробкой, вставьте штуцера в отвод колбы, в одну из соединительных трубок вставьте манометр, установите поршень шприца на отметке 60 мл и вставьте его в другую трубку штуцера. Медленно изменяйте объем воздуха в шприце и наблюдайте за показаниями манометра. Выясните: есть ли утечка воздуха из Вашей установки. Если есть, то устраните её и приступайте к основной части задачи. Используйте следующие обозначения:  $> V_0$  – начальный внутренний объем установки (объем колбы + объем воздуха в шприце (60мл) + объем штуцера и соединительных трубок);  $> P_0$  – атмосферное давление;  $> \Delta P$  – разность давления в колбе и атмосферного давления (показания манометра);  $> P = P_0 + \Delta P$  – давление воздуха в установке;  $> P_S$  – давление насыщенного водяного пара.  $> \Delta V$  – объем воздуха в части шприца, соединенной с колбой;  $> \Delta V_{\max} = 60\text{мл}$  – полный объем шприца.

Во всем задании давление измеряйте в мм рт. ст.; объем в мл. Влажностью комнатного воздуха пренебрегайте. Во всех частях данного задания кратко опишите в какой последовательности Вы проводили измерения (начальные условия, последовательность изменения параметров, измеряемые величины). В теоретических расчетах, где это разумно, принимайте. Что  $\Delta P \ll P_0$ .

### Часть 1. Измерение внутреннего объема.

Измерения проводите при комнатной температуре. В колбе должен находиться атмосферный воздух – убедитесь, что колба сухая! В начальный момент поршень шприца находится на отметке 60 мл, стрелка манометра на нуле.

1.1 Укажите, чему равно атмосферное давление во время проведения экспериментов.

1.2 Получите теоретическую формулу описывающую зависимость разности давлений  $\Delta P$  от объема воздуха в поршне  $\Delta V$  при изотермическом процессе.

1.3 Проведите измерения зависимости разности давлений  $\Delta P$  от объема воздуха в поршне  $\Delta V$ . Постройте график полученной зависимости.

1.4 Используя полученные экспериментальные данные. Найдите внутренний объем установки  $V_0$ .

## Часть 2. Изотермический процесс влажного воздуха.

Залейте в колбу  $V_1 = 200$  мл горячей воды при температуре  $t \approx 50^\circ\text{C}$ . Постарайтесь провести измерения так, чтобы изменением температуры за время проведения измерений можно было пренебречь.

2.1 Укажите точное значение температуры воды.

2.2 Измерьте зависимость разности давлений  $\Delta P$  от объема воздуха в поршне  $\Delta V$ . Постройте график полученной зависимости.

2.3 Используя полученную экспериментальную зависимость, рассчитайте давление насыщенных паров воды при данной температуре воды.

## Часть 3. Зависимость давления насыщенных паров от температуры

В данной части вам необходимо провести измерения зависимости разности давлений от температуры при постоянном объеме. Залейте в колбу 200 мл горячей воды. Доведите давление в колбе до максимально возможного.

Рекомендуем использовать диапазон изменения температуры, включающий температуру, при которой были проведены измерения в Части 2 данного задания.

3.1 Измерьте зависимость разности давлений  $\Delta P$  от температуры влажного воздуха в колбе при постоянном объеме этого воздуха. Постройте график полученной зависимости.

Зависимость давления насыщенного водяного пара  $P_s$  от абсолютной температуры  $T$  описывается уравнением Клапейрона – Клаузиуса

$$\frac{dP_s}{dT} = \frac{L}{TV'}. \quad (1)$$

где  $L$  - удельная теплота испарения воды,  $V'$  - удельный объем (т.е. объем, занимаемый одним килограммом) водяного пара при данных значениях температуры и давления. Можно считать, что водяной пар подчиняется уравнению состояния идеального газа.

Молярная масса воды  $M = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ ; универсальная газовая постоянная  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ; 1 мм рт. ст. = 133 Па.

3.2 Используя полученные экспериментальные данные, рассчитайте удельную теплоту испарения воды.

## Решение

### Задание 2. Давление насыщенных паров воды. Решение.

#### Часть 1. Измерение внутреннего объема.

1.1 Все измерения проведены при атмосферном давлении

$$P_0 = 735 \text{ мм рт.ст.} \quad (1)$$

1.2 Используя закон Бойля – Мариотта, запишем для газа в приборе

$$P_0(V_0 + \Delta V_{\max}) = (P_0 + \Delta P)(V_0 + \Delta V). \quad (2)$$

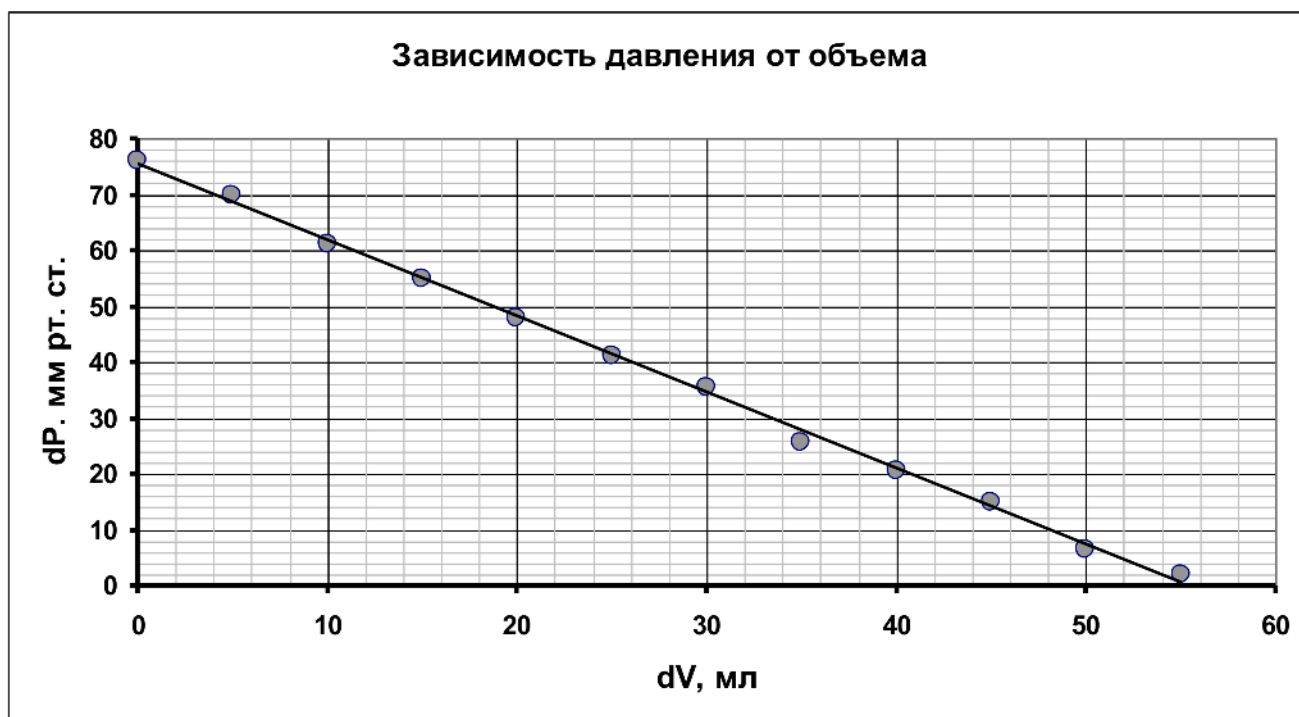
Проведем преобразование уравнения (2), полагая изменение объема малым:

$$P_0 + \Delta P = P_0 \frac{V_0 + \Delta V_{\max}}{V_0 + \Delta V} = P_0 \frac{1 + \frac{\Delta V_{\max}}{V_0}}{1 + \frac{\Delta V}{V_0}} \approx P_0 \left( 1 + \frac{\Delta V_{\max}}{V_0} - \frac{\Delta V}{V_0} \right) \Rightarrow$$
$$\Delta P = \frac{P_0}{V_0} (\Delta V_{\max} - \Delta V) \quad (3)$$

1.3 В начале измерений поршень находился на отметке  $\Delta V_{\max}$ . После присоединения шприца к колбе изменялся объем воздуха  $\Delta V$ , при этом измерялась разность давлений  $\Delta P$ . Измерения проведены при уменьшении объема и в обратном порядке при его увеличении. В качестве окончательного результата использовано среднее значение. Результаты измерений данной зависимости приведены в таблице 1 и на графике.

Таблица 1.

| $\Delta V$ | $(\Delta P)_{\text{сжатие}}$ | $(\Delta P)_{\text{расширение}}$ | $(\Delta P)_{\text{среднее}}$ |
|------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 60         | 0                            | 0                                | 0,0                           |
| 55         | 2                            | 2                                | 2,0                           |
| 50         | 5                            | 8                                | 6,5                           |
| 45         | 16                           | 14                               | 15,0                          |
| 40         | 21                           | 20                               | 20,5                          |
| 35         | 25                           | 26                               | 25,5                          |
| 30         | 37                           | 34                               | 35,5                          |
| 25         | 42                           | 40                               | 41,0                          |
| 20         | 48                           | 48                               | 48,0                          |
| 15         | 56                           | 54                               | 55,0                          |
| 10         | 62                           | 60                               | 61,0                          |
| 5          | 72                           | 68                               | 70,0                          |
| 0          | 76                           | 76                               | 76,0                          |



Полученная зависимость с высокой точностью линейна, поэтому использование приближения (3) оказывается оправданным.

1.4 Из формулы (3) следует, что коэффициент наклона данной зависимости равен  $a = -\frac{P_0}{V_0}$ . Экспериментальное значение этого коэффициента (рассчитанного по МНК) равно  $a = -1,37 \frac{\text{мм}}{\text{мл}}$ , следовательно, внутренний объем прибора равен

$$V_0 = -\frac{P_0}{a} = 540 \text{ мл.} \quad (4)$$

## Часть 2. Изотермический процесс влажного воздуха.

2.1 Измерения проведены при температуре  $t = 51^\circ\text{C}$ .

2.2 Измерения проводились в том же порядке, что и в п.1.2. Результаты измерений приведены в таблице 2 и на графике мм рт. ст. 60 30 56 40 20 0 120 0 0102030405060 dV, мл.

| $\Delta V$ | $\Delta P$ |
|------------|------------|
| 60         | 0          |
| 50         | 19         |
| 40         | 38         |
| 30         | 56         |
| 20         | 76         |
| 10         | 98         |
| 0          | 120        |

| $\Delta V$ | $\Delta P$ |
|------------|------------|
| 60         | 0          |
| 50         | 19         |
| 40         | 38         |
| 30         | 56         |
| 20         | 76         |
| 10         | 98         |
| 0          | 120        |

Экспериментальный тур. 22

**2.3** Полученная зависимость также оказалась близка к линейной. Потому можно воспользоваться выводом, проведенным в п.1.2. Только необходимо учесть, что: – объем занимаемый воздухом уменьшился на объем налитой воды  $V'_0 = V_0 - V = 340$  мл; – полученное уравнение описывает изменения давление сухого воздуха, которое в данном случае оказывается меньше атмосферного на величину давления водяного пара  $P_s$ , поэтому в итоговом уравнении надо давление атмосферное заменить на  $(P_0 - P_s)$ . В итоге теоретическая зависимость задается формулой

$$\Delta P = \frac{P_0 - P_s}{V'_0}(\Delta V_{\max} - \Delta V). \quad (5)$$

В данном случае коэффициент наклона экспериментальной зависимости оказался равным  $a = -1,78 \frac{\text{мм}}{\text{мл}}$ , поэтому

$$a = -\frac{P_0 - P_s}{V'_0} \Rightarrow P_0 - P_s = -aV'_0 \approx 605 \text{ мм рт. ст.} \quad (6)$$

Окончательно находим, что

$$P_s \approx 130 \text{ мм рт. ст.} \quad (7)$$

### Часть 3. Зависимость давления насыщенных паров от температуры

**3.1** Результаты измерений зависимости разности давлений от температуры при описанной методике эксперимента приведены в Таблице 3 и на графике.

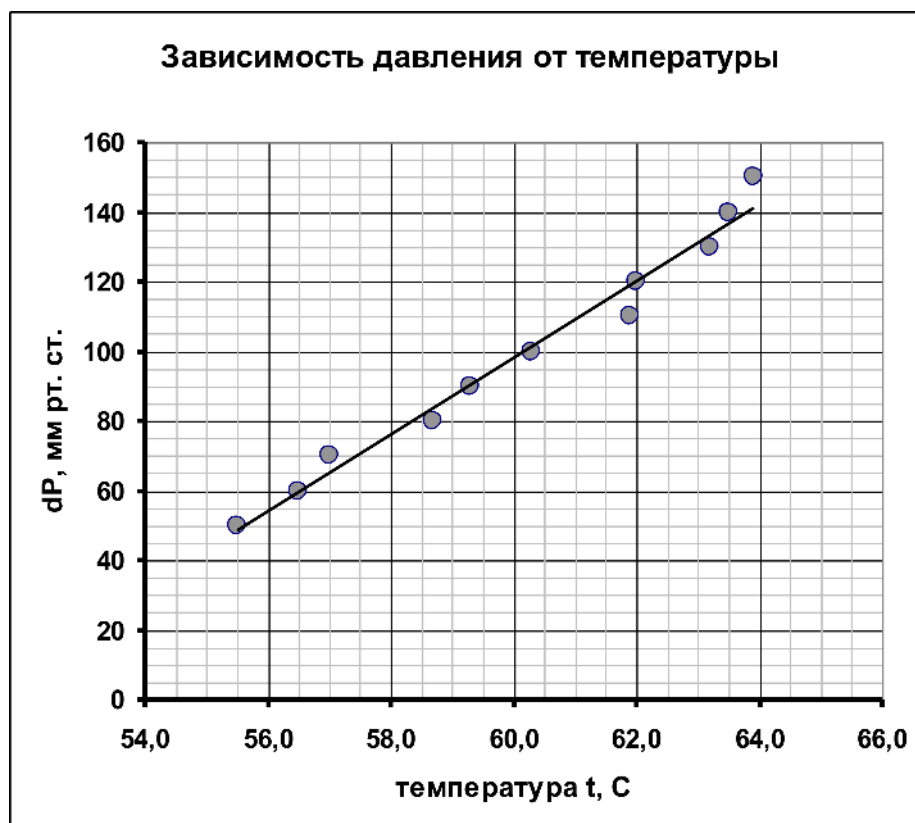


Таблица 3.

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\Delta P, \text{ мм рт. ст.}$ |
|---------------------|--------------------------------|
| 63,9                | 150                            |
| 63,5                | 140                            |
| 63,2                | 130                            |
| 62,0                | 120                            |
| 61,9                | 110                            |
| 60,3                | 100                            |
| 59,3                | 90                             |
| 58,7                | 80                             |
| 57,0                | 70                             |
| 56,5                | 60                             |
| 55,5                | 50                             |

Экспериментальный тур. 23

**3.2** Выразим удельный объем водяного пара из уравнения Менделеева - Клапейрона

$$PV = \frac{m}{M}RT \Rightarrow V' = \frac{V}{m} = \frac{RT}{MP} \quad (8)$$

и подставим его в уравнение Клапейрона – Клаузиуса:

$$\frac{dP_s}{dT} = \frac{L}{TV'} = \frac{LMP_s}{RT^2}. \quad (9)$$

Из этого выражение находим, что удельная теплота испарения выражается формулой:

$$L = \frac{RT^2}{M} \left( \frac{1}{P_s} \frac{dP_s}{dT} \right). \quad (10)$$

Для расчета по этой формуле требуется найти производную от давления насыщенного пара по температуре. Ее можно найти по результатам измерений зависимости разности давлений от температуры. Для этого запишем уравнение Клапейрона для сухого воздуха, содержащегося в колбе:

$$\frac{P_0 + \Delta P - P_s}{T} = \frac{P_0 + \Delta P_0 - P_{s0}}{T_0}. \quad (11)$$

Здесь  $\Delta P_0$  разность давлений,  $P_{s0}$  давление насыщенного водяного пара при некоторой температуре  $T_0$ , в качестве которой лучше взять температуру, для которой измерено давление насыщенного пара в части 2. Из уравнения (11) находим

$$P_s = P_0 + \Delta P - \frac{T}{T_0}(P_0 + \Delta P_0 - P_{s0}) \quad (12)$$

Теперь не сложно найти требуемую производную

$$\frac{dP_s}{dT} = \frac{d(\Delta P)}{dT} - \frac{P_0 + \Delta P_0 - P_{s0}}{T_0} \quad (13)$$

Из графика полученной зависимости находим, что коэффициент его наклона равен

$$a = \frac{d(\Delta P)}{dT} \approx 11,0 \frac{\text{мм}}{\text{К}}. \quad (14)$$

При средней температуре диапазона  $T = (60+273)\text{К} = 333\text{К}$  давление насыщенного водяного пара равно  $P_{s0} = 130\text{мм рт.}$  поэтому

$$\frac{dP_s}{dT} = \frac{d(\Delta P)}{dT} - \frac{P_0 + \Delta P_0 - P_{s0}}{T_0} = 11,0 - \frac{735 + 100 - 130}{333} = 8,9 \frac{\text{мм}}{\text{К}}. \quad (15)$$

Тогда, окончательно получим для удельной теплоты испарения

$$L = \frac{RT^2}{M} \left( \frac{1}{P_s} \frac{dP_s}{dT} \right) = \frac{8,31 \cdot (333)^2}{18 \cdot 10^{-3}} \frac{8,9}{150} = 3,0 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}. \quad (16)$$

Найденное значение всего на 30% процентов превышает табличное значение.

Экспериментальный тур. 24