

Условие

Задание 2. «Насыщенный пар»

В данной работе вам предстоит исследовать зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры. Напоминаем – эта зависимость не линейна, кроме того давление водяного пара резко возрастает с ростом температуры.

Оборудование: Штатив с двумя лапками, две стеклянных трубки с миллиметровыми шкалами, термометр, трубка гибкая пластиковая, горячая и холодная вода.

Соберите установку, показанную на рисунке: в штативе закрепите трубку большего диаметра, внутри расположите трубку меньшего диаметра, закрытым концом вверх (проследите, чтобы вода могла заходить в трубку снизу), в другой лапке штатива укрепите термометр, так чтобы его измерительная часть была погружена между трубками.

***Будьте предельно аккуратны, пожалуйста, не разбейте оборудование!

Обязательно! – сначала залейте в трубку горячую воду, при этом часть воздуха выйдет из тонкой внутренней трубки, в дальнейшем количество воздуха в этой трубке должно оставаться постоянным!***

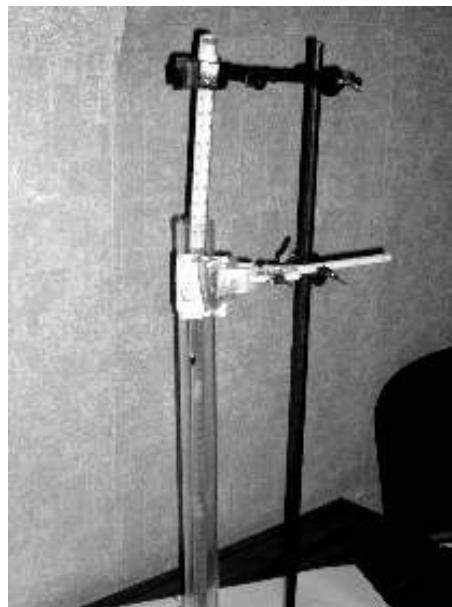
1. Измерьте зависимость высоты столба газа в трубке от температуры, постройте график этой зависимости.

*В ходе измерений, вы можете доливать, сливать горячую и холодную воду в толстой трубке, рекомендуем для этого использовать гибкий шланг. Обязательно перемешиваете воду в толстой трубке, чтобы температура воды была одинакова по всей высоте. Для перемешивания используйте метод барбализации – пропускания через жидкость воздушных пузырьков, в качестве насоса используйте собственные легкие. Заодно – помоете пол в аудитории.

Измерения при высокой температуре удобно проводить, просто дожидаясь остывания воды, для получения результатов при низких (близким к комнатным) температурах требуют долива холодной воды – уж больно медленно она остывает!*

В ходе измерений фиксируйте также высоту уровня воды в широкой трубке – вдруг вам понадобится очень точное значение давления газа в узкой трубке! Значение атмосферного давления вам будет указано.

2. Допустим, что при низких температурах ($20^{\circ} - 30^{\circ}$) давлением паров воды можно пренебречь. В этом случае согласно уравнению состояния идеального газа (помните такое?) объем газа линейно зависит от температуры и обратно пропорционален давлению. Проверьте это предположение, оцените на основании своих измерений значение абсолютного нуля температуры (в градусах Цельсия).



3. В соответствии с уравнением Клапейрона-Клаузиуса (знание этого уравнения от вас не требуется) давление насыщенных паров $P_{\text{нас.}}(T)$ связано с абсолютной температурой T соотношением

$$\ln \frac{P_{\text{нас.}}(T)}{P_{\text{нас.}}(T_0)} = -\frac{qM}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right), \quad (1)$$

где $M = 18 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$ - молярная масса воды, $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ - универсальная газовая постоянная; q - удельная теплота испарения воды, $P_{\text{нас.}}(T_0)$ - давление насыщенного пара при температуре T_0 .

На основании проведенных измерений проверь выполнимость формулы (1).

Приведите формулу, с помощью которой вы рассчитывали это давление (то есть, как вы исключили давление сухого воздуха в трубке).

Определите значение удельной теплоты испарения воды.

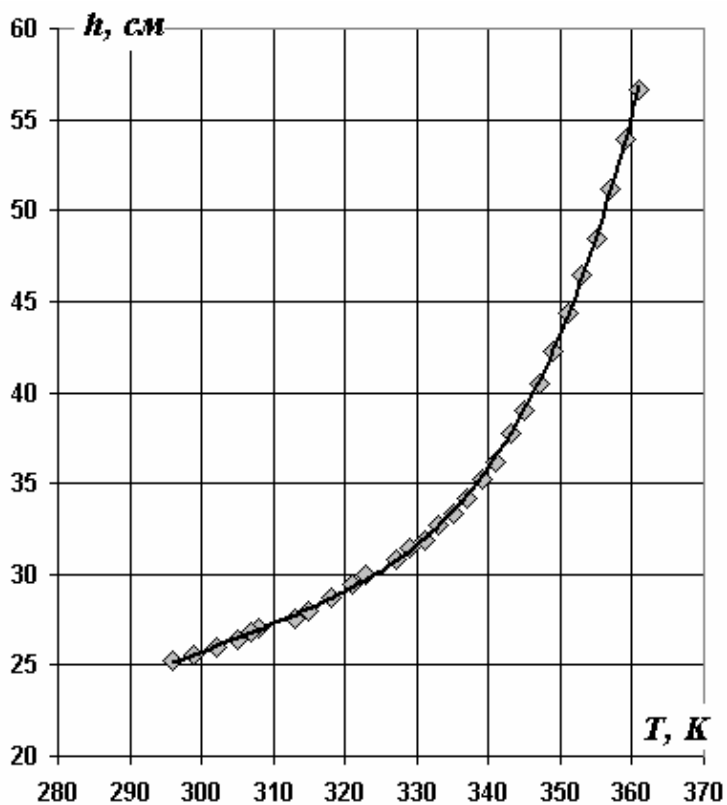
Решение

Задание 2. «Насыщенный пар»

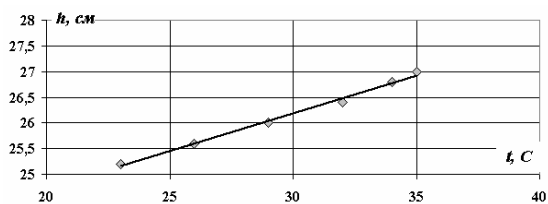
Зависимость высоты столба газа в трубке от температуры представлена в таблице 1 и на графике (в последнем столбце даны значения высоты уровня воды в широкой трубке).

Таблица 1.

t, C	**T, K**	**h, см**	**H, см**
88	361	56,6	4,8
86	359	53,9	5
84	357	51,2	5,4
82	355	48,5	5,7
80	353	46,5	6,1
78	351	44,4	6,4
76	349	42,3	6,7
74	347	40,5	7
72	345	39	7,2
70	343	37,7	7,5
68	341	36,2	7,8
66	339	35,2	8
64	337	34,2	8,1
62	335	33,3	8,2
60	333	32,7	8,4
58	331	31,9	8,5
56	329	31,4	8,6
54	327	30,8	8,7
50	323	30	1,2
48	321	29,5	1,3
45	318	28,7	1,5
42	315	28	1,6
40	313	27,6	1,8
35	308	27	4,2
34	307	26,8	4,1
32	305	26,4	3,8
29	302	26	4,8
26	299	25,6	5,8
23	296	25,2	5,6



Прекрасно видно, что данная зависимость не линейна, следовательно, влияние давления насыщенных паров воды в трубке существенно. Заметим, что во всех случаях можно пренебречь гидростатическим давлением столба воды по сравнению с атмосферным давлением.



Поэтому, если не учитывать влияние паров, то зависимость объема воздуха от

температуры описывается уравнением

$$h = h_0(1 + \alpha t). \quad (1)$$

Тогда значение абсолютного нуля температур оценивается как $t_0 = -\alpha^{-1}$. По данным измерений это значение равно $t_0 = -\alpha^{-1} \approx -145^\circ\text{C}$, что весьма далеко от табличного значения. Следовательно, и в этом диапазоне давление паров воды существенно.

3. Для проверки справедливости уравнения Клапейрона-Клаузиуса необходимо из общего давления газов в трубке вычесть давление сухого воздуха. Сухой воздух подчиняется уравнению состояния идеального газа, поэтому для него можно записать

$$\frac{Ph}{T} = \frac{P_0 h_0}{T_0} \quad (2)$$

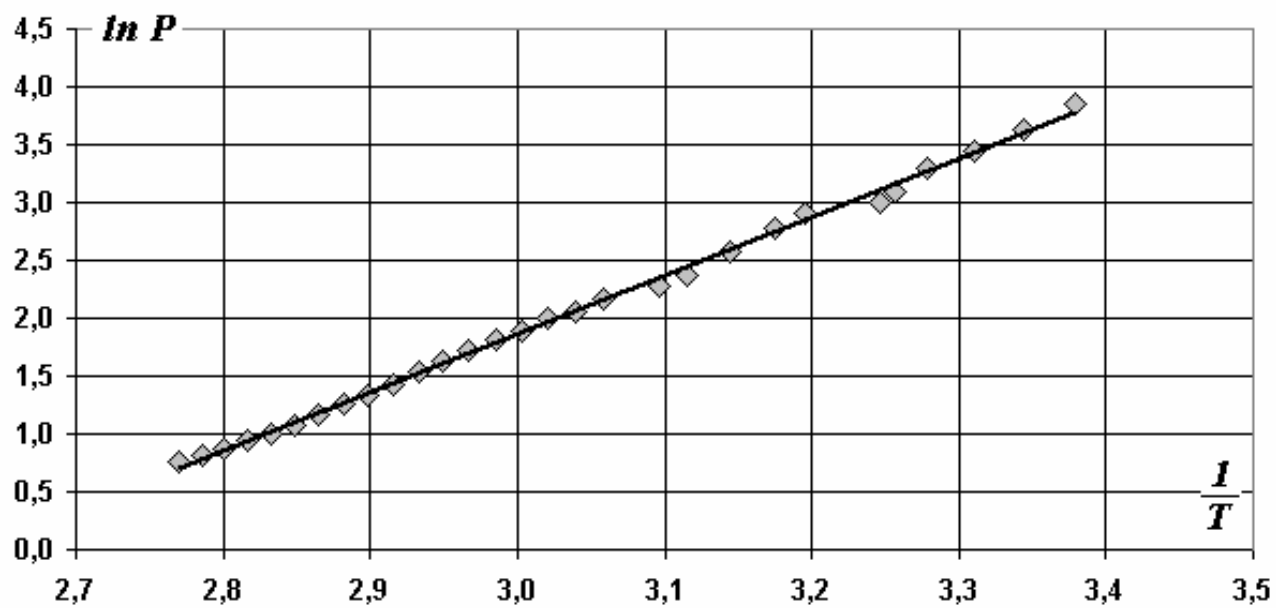
где h_0 высота столба, которого бы занимал сухой воздух при температуре T_0 . По прежнему, полагая атмосферное давление значительно большим гидростатического, можно записать

$$P_0 = P_0 \frac{h_0}{T_0} \frac{T}{h} + P_{\text{пара}}, \quad (3)$$

Откуда следует, что давление водяного пара можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{пара}} = P_0 \left(1 - \frac{h_0}{T_0} \frac{T}{h} \right), \quad (4)$$

Расчет давления водяного пара по этой формуле приводит к следующему графику логарифма давления водяного пара от величины, обратной абсолютной температуре (что требует уравнение Клапейрона – Клаузиуса).



Этот график подтверждает справедливость данного уравнения и доказывает, что в данном эксперименте действительно основной вклад вносит давление насыщенного пара. Найденное по данной зависимости значение удельной теплоты испарения воды

$$q = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$$

очень близко к табличному значению.