

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ФИЗТЕХ-ШКОЛА РАДИОТЕХНИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ

# Работа 2.4.1.

## Определение теплоты испарения жидкости

Работу выполнил:  
Долгов Александр Алексеевич, группа Б01-106

Долгопрудный, 2022

# Содержание

<b>1</b>	<b>Аннотация . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Теоретические сведения . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Методика измерений . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Экспериментальная установка . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Приборы и инструментальные погрешности . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>6</b>	<b>Обработка полученных результатов . . . . .</b>	<b>6</b>
<b>7</b>	<b>Вывод . . . . .</b>	<b>6</b>
<b>8</b>	<b>Приложения . . . . .</b>	<b>8</b>
8.1	Таблица 1. Нагревание . . . . .	8
8.2	Таблица . Охлаждение . . . . .	8
8.3	График 1. $P(T)$ при нагревании . . . . .	9
8.4	График 2. $\ln(P) (1/T)$ при нагревании . . . . .	9
8.5	График 3. $P(T)$ при охлаждении . . . . .	10
8.6	График 4. $\ln(P) (1/T)$ при охлаждении . . . . .	10
8.7	График 5. Нагревание и охлаждение . . . . .	11

---

# 1 Аннотация

В данной работе измеряются давление насыщенного пара и теплота испарения жидкости при различных температурах. Теплота испарения определяется с помощью уравнения Клапейрона-Клаузиуса.

## 2 Теоретические сведения

**Испарение** - процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное.

Испарение происходит на свободной поверхности жидкости. Покинуть поверхность способны только молекулы с достаточной для этого кинетической энергией, поэтому испарение жидкости приводит к её охлаждению. Ясно, что для предотвращения охлаждения к жидкости необходимо подводить тепло.

**Молярная теплота испарения** - количество теплоты, необходимое для изотермического испарения одного моля жидкости при внешнем давлении, равном давлению её насыщенного пара.

**Фаза** - макроскопическая однородная часть вещества, отделённая от остальных частей системы границей раздела так, что она может быть извлечена из системы механическим путём.

В случае равновесия двух фаз справедливо уравнение Клапейрона-Клаузиуса:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T(v_2 - v_1)}, \quad (1)$$

где  $P$  - давление в системе,  $L$  - температура системы,  $v_{1,2}$  - молярный объём фаз 1 и 2 соответственно,  $L$  - молярная теплота фазового перехода (испарения в нашем случае). Для воды:  $v_{\text{вод}} = 18 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$ , для пара:  $v_{\text{пар}} = 31 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$ . Из этого следует, что уравнение (1) можно записать в виде:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T \cdot v_{\text{пар}}} \quad (2)$$

---

Запишем уравнение Ван-дер-Ваальса для водяного пара:

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (3)$$

Для водяного пара:  $a = 0,4 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2}$ ,  $b = 26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$ .  $b \ll v$ , поэтому  $v - b \approx v$ . Слагаемым  $\frac{a}{v^2}$  также можно пренебречь по сравнению с  $P$ , так как измерения проводятся при давлении ниже атмосферного. Таким образом, уравнение (3) переходит в уравнение состояния идеального газа:

$$Pv = RT \quad (4)$$

Подставим (4) в (2):

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dT} &= \frac{PL}{RT^2} \Rightarrow L = R \frac{dP/P}{dT/T^2} \\ L &= -R \frac{d(\ln P)}{d(1/T)} \end{aligned} \quad (5)$$

### 3 Методика измерений

Молярная теплота испарения определяется по формуле (5). При этом температура жидкости измеряется термометром, давление - манометром. Производные  $\frac{d(\ln P)}{d(1/T)}$  определяются графически как угловые коэффициенты касательной к кривой, построенной в координатах, где по оси абсцисс отложена величина  $\ln P$ , а по оси ординат - величина  $\frac{1}{T}$ .

### 4 Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1. Установка включает в себя термостат А, экспериментальный прибор В и отсчётный микроскоп С.

Экспериментальный прибор В представляет собой ёмкость 12, заполненную водой. В неё погружен запаянный прибор 13 с исследуемой жидкостью 14. Перед заполнением исследуемой жидкостью воздух из прибора 13 был удалён, так что над жидкостью находится только её насыщенный пар.

Давление пара определяется по ртутному манометру 15, соединённому с ёмкостью 13. Численная величина давления измеряется по разности показаний отсчётного микроскопа 16, настраиваемого последовательно на нижний и верхний уровни столбика ртути манометра. Показания микроскопа снимаются по шкале 17.

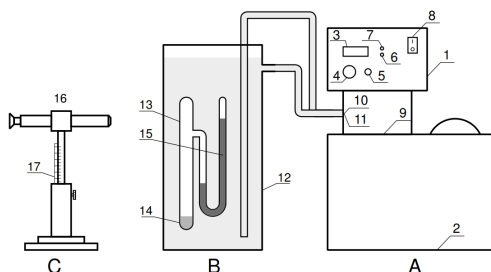


Рис. 1. Схема установки для определения теплоты испарения

Экспериментальная установка обладает тем недостатком, что термометр измеряет температуру термостата, а не исследуемой жидкости. Эти температуры можно считать равными, если нагревание происходит достаточно медленно (квазистатически).

## 5 Приборы и инструментальные погрешности

Погрешность измерения температуры считаем равной  $\sigma_t = 0.5 \text{ K}$ , поскольку температура флуктуировала в таких пределах в ходе практически каждого измерения (младший разряд шкалы термометра - десятые доли градуса).

Давление находилось косвенно из измерений высоты ртутного столба. Давление в паскалях можно получить по формуле:

$$P_{\text{Па}} = 13600 \cdot 9,8 \cdot h_{\text{мм}},$$

где  $P_{\text{Па}}$  - давление в паскалях, 13600 - плотность ртути (ею заполнен манометр) в  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , 9,8 - ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли в  $\frac{\text{Н}}{\text{кг}}$ ,  $h_{\text{мм}}$  - высота ртутного столба в миллиметрах.

Погрешностью измерения величины  $h_{\text{мм}}$  считаем половину цены деления микроскопа, то есть  $\sigma_h = 0,5 \text{ мм}$ . Таким образом, погрешность вычисления давления можно найти по формуле:

$$\sigma_P = 13600 \cdot 9,8 \cdot \sigma_h$$

## 6 Обработка полученных результатов

Было проведено 2 серии экспериментов по измерению зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры. В первой серии температура термостата постепенно увеличивалась, во второй - уменьшалась. Результаты измерений приведены в таблицах 1 (нагревание) и 2 (охлаждение). По этим данным построены графики в координатах  $P(T)$  (график 1: нагревание, график 3: охлаждение) и  $\ln P(1/T)$  (график 2: нагревание, график 4: охлаждение). На каждом из графиков проведены аппроксимирующие прямые согласно методу наименьших квадратов. Обозначим коэффициент наклона прямой на  $i$ -м графике через  $k_i$ , тогда:

$$k_1 = (209 \pm 7) \frac{\text{Па}}{\text{К}}$$

$$k_2 = (-5,93 \pm 0.05) \cdot 10^3 \text{ К}$$

$$k_3 = (231 \pm 6) \frac{\text{Па}}{\text{К}}$$

$$k_4 = (-6.3 \pm 0.2) \cdot 10^3 \text{ К}$$

Теперь получим молярные теплоты парообразования по графикам 2 и 4. Из (5) получаем:

$$L_{2,4} = -k_{2,4}R; \quad \sigma_L = \sigma_k R$$

Поэтому:

$$L_2 = (49300 \pm 400) \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

$$L_4 = (52400 \pm 1700) \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

Для сравнения двух серий также построен график 5 в координатах  $P(T)$ , содержащий лишь экспериментальные точки обеих серий.

## 7 Вывод

В ходе работы были получены два значения молярной теплоты парообразования воды. Оба результата не совпадают с табличным значением, которое равно  $L = 40662 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ . Объяснить такое несоответствие

---

можно неточностью измерения давления, так как оно измерялось человеком, а не электронным прибором как температура. Тем не менее результат, найденный из данных, соответствующих нагреванию воды, оказался более точным как в смысле относительной погрешности, так и в смысле близости к истинному результату.

---

## 8 Приложения

### 8.1 Таблица 1. Нагревание

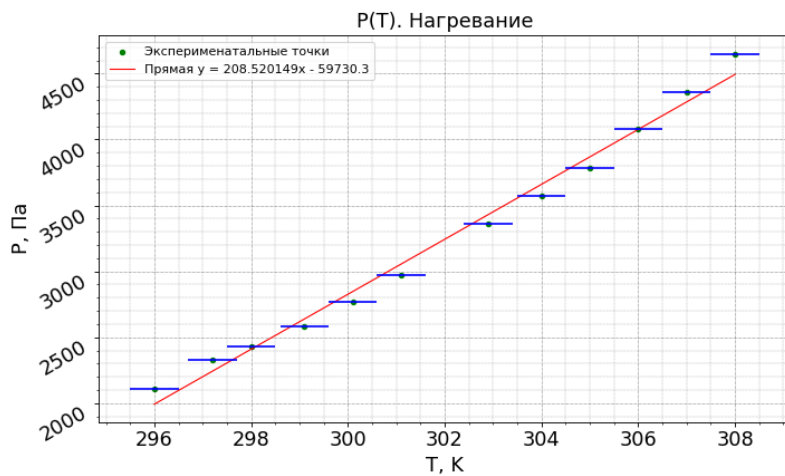
T, K	$\sigma_T$ , K	h, мм	$\sigma_h$ , мм	P, Па	$\sigma_P$ , мм
296,0	0,5	15,8	0,05	2106	7
297,2		17,5		2332	
298,0		18,2		2426	
299,1		19,4		2586	
300,1		20,8		2772	
301,1		22,3		2972	
302,9		25,2		3359	
304,0		26,8		3572	
305,0		28,4		3785	
306,0		30,6		4078	
307,0		32,7		4358	
308,0		34,9		4651	

### 8.2 Таблица . Охлаждение

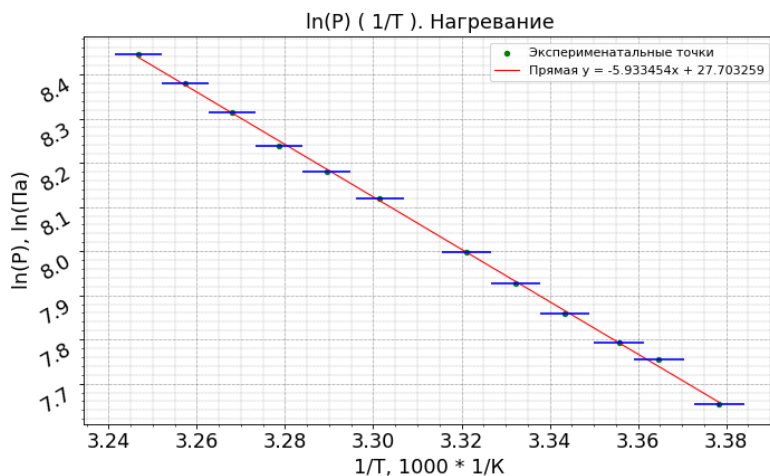
T, K	$\sigma_T$ , K	h, мм	$\sigma_h$ , мм	P, Па	$\sigma_P$ , мм
307,0	0,5	34,5	0,05	4598	7
306,0		33,5		4465	
305,0		32,7		4358	
304,0		30,5		4065	
303,0		28,8		3838	
302,0		26,1		3479	
301,0		25,2		3359	
300,0		22,7		3025	
299,0		21,4		2852	
298,0		19,5		2599	
297,0		17,9		2386	
296,0		16,5		2199	



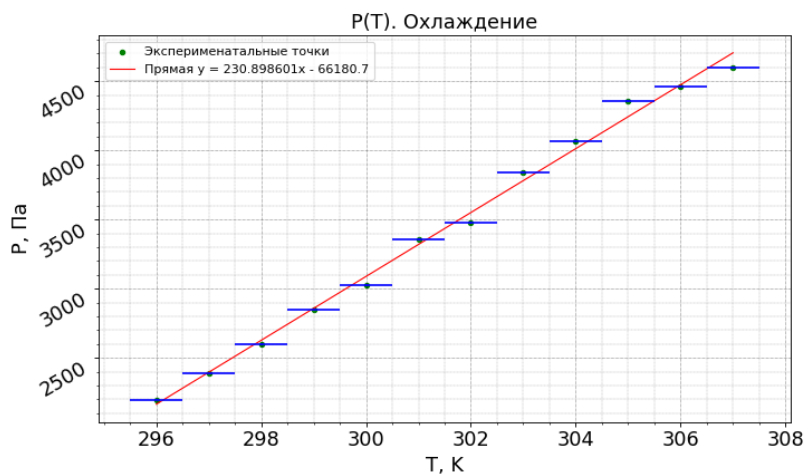
### 8.3 График 1. $P(T)$ при нагревании



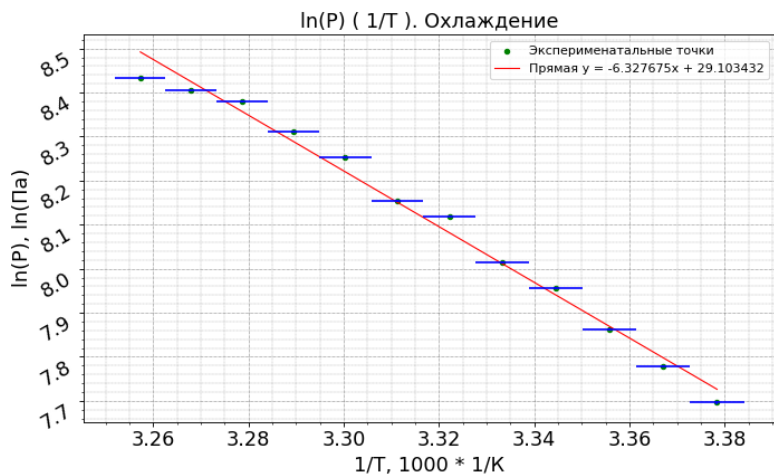
### 8.4 График 2. $\ln(P) (1/T)$ при нагревании



## 8.5 График 3. $P(T)$ при охлаждении



## 8.6 График 4. $\ln(P)$ ( $1/T$ ) при охлаждении



## 8.7 График 5. Нагревание и охлаждение

