

# Работа 2.4.1

## Определение теплоты испарения жидкости

Панферов Андрей

### 1 Аннотация

В данной работе измеряется давление насыщенного пара жидкости при разной температуре, по полученным данным вычисляется теплота её испарения с помощью уравнения Клапейрона–Клаузиуса.

### 2 Теоретические сведения

Испарением называется переход вещества из жидкого в газообразное состояние. Чтобы испарение проходило без изменения температуры, к жидкости нужно подводить тепло. Количество теплоты, необходимое для изотермического испарения одного моля жидкости при внешнем давлении, равном упругости ее насыщенных паров, называется *молярной теплотой испарения*.

В настоящей работе для определения теплоты испарения применен косвенный метод, основанный на формуле Клапейрона–Клаузиуса

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\mu L}{T(V_2 - V_1)}$$

С помощью уравнения Ван-дер-Ваальса можно получить зависимость  $P(T)$ , с помощью которой определить искомую величину.

$$(P + \frac{a}{V^2})(V - b) = RT$$

В таблице ниже приведены все значения параметров различных жидкостей уравнения Ван-дер-Ваальса в условиях данного опыта.

Вещество	$T_{\text{кип}}$ К	$V_1$ , $10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$	$V_2$ , $10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$	$b$ , $10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$	$a$ , $\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2}$	$a/V_2^2$ кПа
Вода	373	18	31	26	0,4	0,42
$\text{CCl}_4$	350	97	29	126	1,95	2,3
Этиловый эфир	307	104	25	137	1,8	2,9
Этиловый спирт	351	58	29	84	1,2	1,4

Откуда видно, что  $\frac{V_1}{V_2} < 0.005$ , а  $\frac{a}{PV^2} < 0.03$ , ошибка метода измерений равна 4%, тогда

$$PV = \nu RT$$
$$L = \frac{RT^2}{\mu P} \frac{dP}{dT} = -\frac{R}{\mu} \frac{d(\ln P)}{d(\frac{1}{T})}$$

### 3 Оборудование и инструментальные погрешности

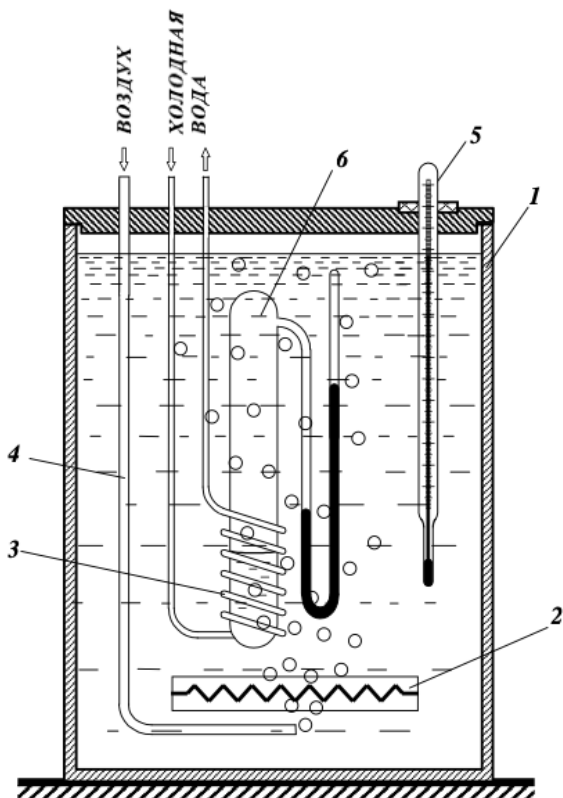
В работе используются: термостат; герметический сосуд, заполненный исследуемой жидкостью; отсчетный микроскоп.

**Инструментальные погрешности измерений:**

Градусник – 0,2 К

Штангенциркуль – 0,1 мм

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА



На рисунке слева изображена схема установки. Наполненный водой резервуар 1 играет роль термостата. Нагревание термостата производится спиралью 2, подогреваемой электрическим током. Для охлаждения воды в термостате через змеевик 3 пропускается водопроводная вода. Вода в термостате перемешивается воздухом, поступающим через трубку 4. Температура воды измеряется термометром 5. В термостат погружен запаянный прибор 6 с исследуемой жидкостью. Над ней находится насыщенный пар (перед заполнением прибора воздух из него был откачан). Давление насыщенного пара определяется по ртутному манометру, соединенному с исследуемым объемом. Отсчет показаний манометра производится при помощи микроскопа.

### 4 Результаты измерений и обработка данных

#### 4.1 Подготовка к эксперименту

Измерим разность уровней в ртутном U - образном манометре с помощью микроскопа и температуру по термометру. Включим термостат. Через каждый градус будем измерять разность высот и температуру. Продолжим повышать температуру в течение половины имеющегося у нас времени, чтобы успеть произвести измерения при остывании прибора. Проведём те же измерения при охлаждении жидкости. Установим такой поток воды, чтобы охлаждение шло примерно тем же темпом, что и нагревание.

## 4.2 Проведение измерений

Измерим начальную разность уровней:

$$\Delta H_0 = 18.0 \pm 0.1 \text{ мм}$$

Проведем измерения с шагом 1 градус при нагревании и последующем охлаждении системы. Результаты занесем в *Таблицу 1*:

Таблица 1: Результаты измерений и их первичная обработка

T, C	$H_{up}$ , мм	$H_{down}$ , мм	$\Delta H_{up}$ , мм	$\Delta H_{down}$ , мм	$1/T$ , $1/K \cdot 10^{-5}$	$\ln(\frac{P_{up}}{P_0})$	$\ln(\frac{P_{down}}{P_0})$
20	79.5	79.6	18.0	17.8	341.3	0.000	-0.011
21	79.0	79.1	19.0	18.8	340.1	0.054	0.043
22	78.7	78.4	19.6	20.2	339.0	0.085	0.115
23	78.0	78.0	21.0	21.0	337.8	0.154	0.154
24	77.4	77.5	22.2	22.0	336.7	0.210	0.201
25	76.9	77.0	23.2	23.0	335.6	0.254	0.245
26	76.2	76.2	24.6	24.6	334.4	0.312	0.312
27	75.5	75.4	26.0	26.2	333.3	0.368	0.375
28	74.8	74.7	27.4	27.6	332.2	0.420	0.427
29	74.2	73.8	28.6	29.4	331.1	0.463	0.491
30	73.5	72.9	30.0	31.2	330.0	0.511	0.550
31	72.5	72.2	32.0	32.6	328.9	0.575	0.594
32	71.7	71.3	33.6	34.4	327.9	0.624	0.648
33	70.8	70.0	35.4	37.0	326.8	0.676	0.721
34	69.7	69.2	37.6	38.6	325.7	0.737	0.763
35	68.4	68.0	40.2	41.0	324.7	0.803	0.823
36	67.6	66.9	41.8	43.2	323.6	0.843	0.875
37	66.1	65.9	44.8	45.2	322.6	0.912	0.921
38	65.0	64.7	47.0	47.6	321.5	0.960	0.972
39	63.8	63.7	49.4	49.6	320.5	1.010	1.014
40	62.4	62.4	52.2	52.2	319.5	1.065	1.065
$\sigma T \approx 0.2$	$\sigma H \approx 0.1$		$\sigma \Delta H = 2 \sigma H \approx 0.2$		$\sigma 1/T \approx 0.3$		

## 4.3 Обработка результатов измерений

В нее же занесем погрешности и результаты обработки измерений:

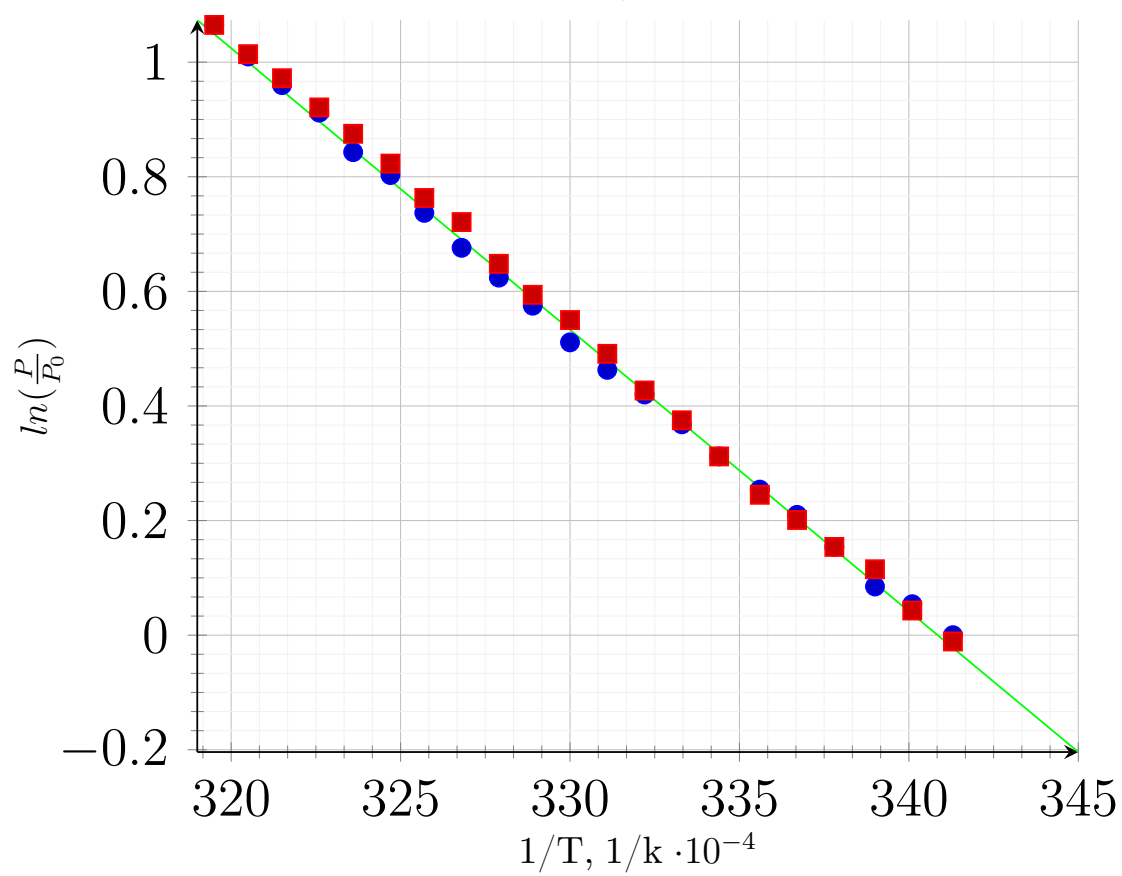
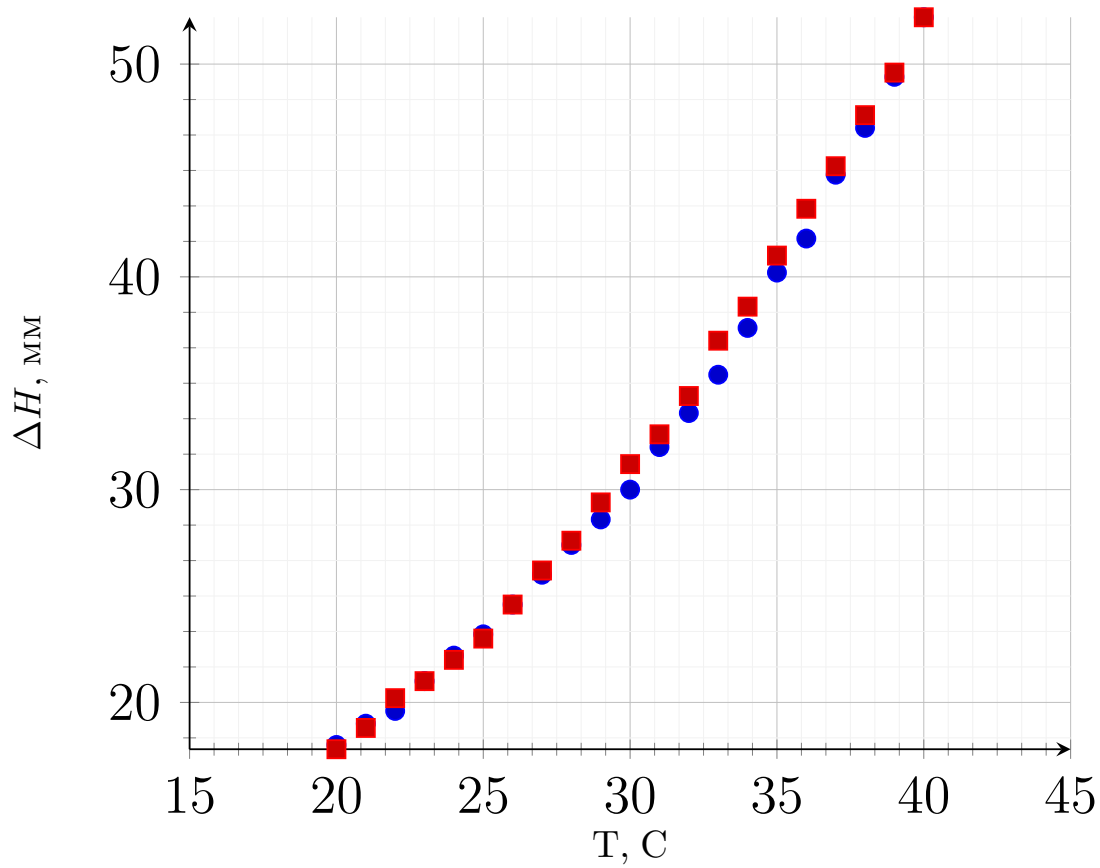
$$\Delta H = \Delta H_0 - 2H + 2H_0$$

, где  $H_0$  - высота при температуре 20 C

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = \ln\left(\frac{\Delta H}{\Delta H_0}\right)$$

$$\sigma \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \approx \frac{2\sigma \Delta H}{\Delta H} \approx 0.015$$

Сначала построим график зависимости  $\Delta H$  от  $T$  (по сути  $\Delta P$  от  $T$ ). На одни оси нанесем данные повышения и понижения температуры. Построим ту же зависимость в координатах  $1/T$  от  $\ln(\frac{P}{P_0})$  на другом графике:



Заметно небольшое различие зависимостей давления от температуры при нагревании и охлаждении.

$\Delta H$  от  $T$ : Для нахождения  $L$  необходимо сосчитать производную в каждой точке, для этого воспользуемся методом сплайнов "в первом приближении" (так же будем учитывать строгую монотонность производной в силу итак большой погрешности эксперимента), для чего по каждому трём точкам мысленно построим параболу и найдем её угловой коэффициент для зависимости  $\Delta H$  от  $T$ . Полученные результаты занесем в *Таблицу 2*. Далее найдём среднее значение теплоты испарения.

Таблица 2: Вычисление касательных к графику

$T$	$\frac{dP}{dT_{up}}, \text{Па/К}$	$\frac{dP}{dT_{down}}, \text{Па/К}$	$L_{up}, \text{кДж/кг}$	$L_{down}, \text{кДж/кг}$
21	7.84	11.76	1678	2545
22	9.80	10.78	2048	2186
23	12.74	8.82	2501	1732
24	10.78	9.80	2016	1849
25	11.76	12.74	2118	2315
26	13.72	15.68	2347	2682
27	13.72	14.70	2235	2376
28	12.74	15.68	1982	2422
29	12.74	17.64	1912	2575
30	16.66	15.68	2399	2171
31	17.64	15.68	2397	2092
32	16.66	21.56	2171	2744
33	19.60	20.58	2440	2451
34	23.52	19.60	2775	2252
35	20.58	22.54	2285	2454
36	22.54	20.58	2423	2141
37	25.48	21.56	2572	2157
38	22.54	21.56	2183	2062
39	25.48	22.54	2363	2082
$L_{cp} = (2.3 \pm 0.3) \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$				

К статистической погрешности прибавим приборную погрешность и получим:

$$L = 2.3 \pm 0.3 \text{ МДж/кг}$$

$\ln(\frac{P}{P_0})$  от  $1/T$ : График и так линеен, поэтому найдем его угловой коэффициент и напрямую из него  $L$ :

$$L = 2.27 \pm 0.04 \text{ МДж/кг}$$

Полезно будет сравнить результаты с табличными значениями:

$$L_{\text{табл}} = 2.26 \text{ МДж/кг}$$

## 5 Выводы

Оба метода дают результаты совпадающие с табличными значениями. Что также подтверждает, что наша оценка применимости модели, которую мы провели в начале работы, была верна.

Точности двух методов вычисления значительно отличаются; вероятно из-за большого влияния погрешности измерений на точечные вычисления производной. График в осях  $\ln(P)$  от  $1/T$  более информативен и нагляден и является предпочтительным при вычислении  $L$ .

Разница данных при нагревании и при охлаждении, в основном, лежит в пределах погрешности измерений и никаких тенденций в отклонениях не наблюдается.