

# Работа 2.4.1

## Определение теплоты испарения жидкости

Стрижак Даниил

### 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

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

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

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

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

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

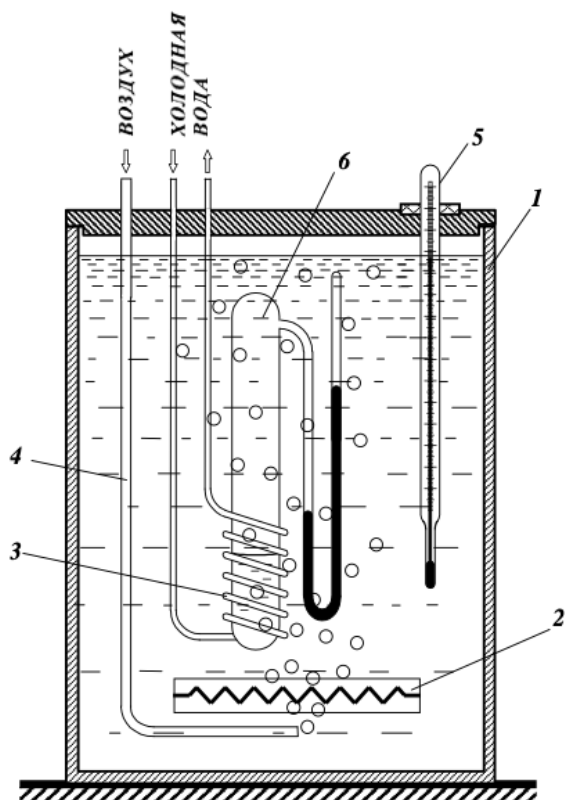
### 3 Оборудование и инструментальные погрешности

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

Инструментальные погрешности измерений: Градусник – 0,2 К

"Штангенциркуль, 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.

$$P_0 = 1 \text{ мм. рт. ст.}$$

## 4.2 Проведение измерений

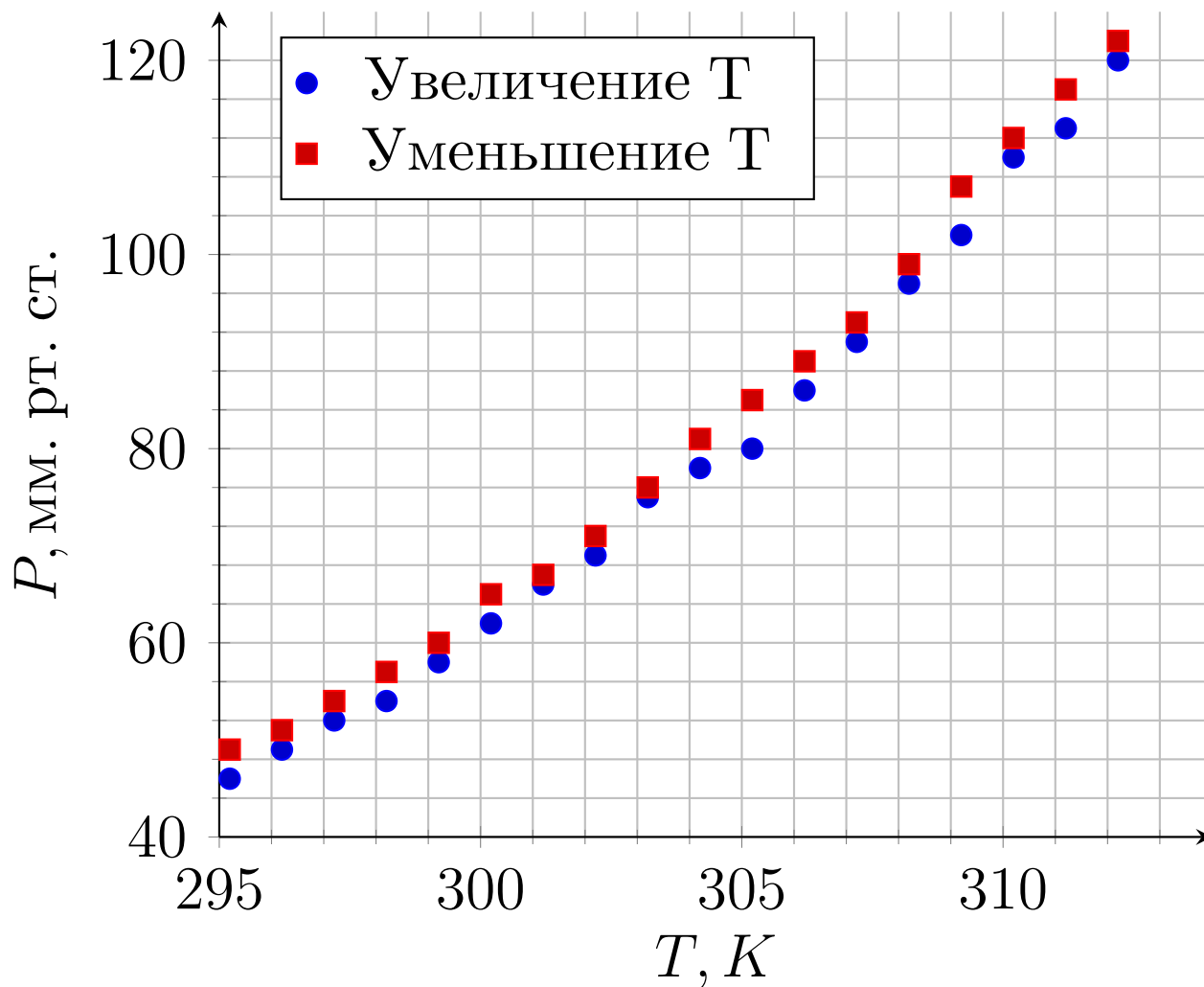
Таблица измерений при нагревании.

$T,$ $K$	$h_1,$ мм	$h_2,$ мм	$\Delta h,$ мм	$P,$ кПа	$\ln(\frac{P}{P_0})$	$1/T,$ $K^{-1} \cdot 10^{-4}$	$\sigma_P,$ %	$\sigma_{\frac{1}{T}},$ %	$\sigma_{\ln(\frac{P}{P_0})},$ %
295,2	34	80	46	6,1	3,83	33,88	4,3	0,07	1,1
296,2	33	82	49	6,5	3,89	33,76	4,1	0,07	1,1
297,2	31	83	52	6,9	3,95	33,65	3,8	0,07	1,0
298,2	30	84	54	7,2	3,99	33,53	3,7	0,07	0,9
299,2	28	86	58	7,7	4,06	33,42	3,4	0,07	0,9
300,2	26	88	62	8,3	4,13	33,31	3,2	0,07	0,8
301,2	24	90	66	8,8	4,19	33,21	3,0	0,07	0,7
302,2	23	92	69	9,2	4,23	33,09	2,9	0,07	0,7
303,2	20	95	75	10,0	4,32	32,98	2,7	0,07	0,6
304,2	18	96	78	10,4	4,36	32,87	2,6	0,07	0,6
305,2	17	97	80	10,7	4,38	32,77	2,5	0,07	0,6
306,2	14	100	86	11,5	4,45	32,66	2,4	0,07	0,6
307,2	12	103	91	12,1	4,51	32,55	2,2	0,07	0,5
308,2	8	105	97	12,9	4,57	32,45	2,1	0,07	0,5
309,2	6	108	102	13,6	4,62	32,34	2,0	0,07	0,5
310,2	2	112	110	14,7	4,70	32,24	1,8	0,07	0,5
311,2	1	114	113	15,1	4,73	32,14	1,8	0,07	0,4
312,2	2	122	120	16,0	4,79	32,03	1,7	0,07	0,4
313,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица измерений при охлаждении.

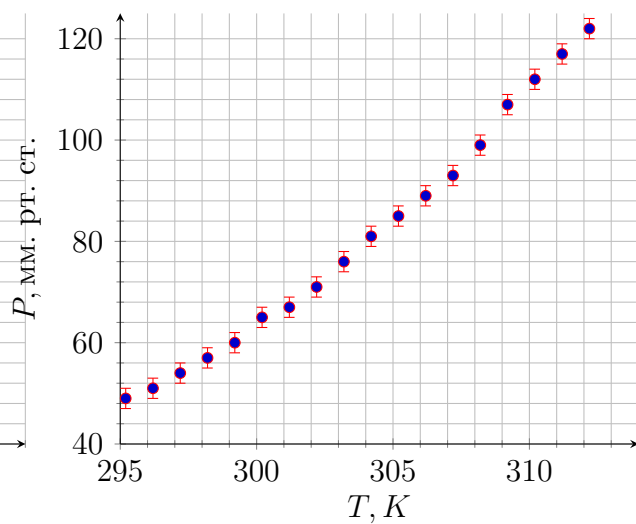
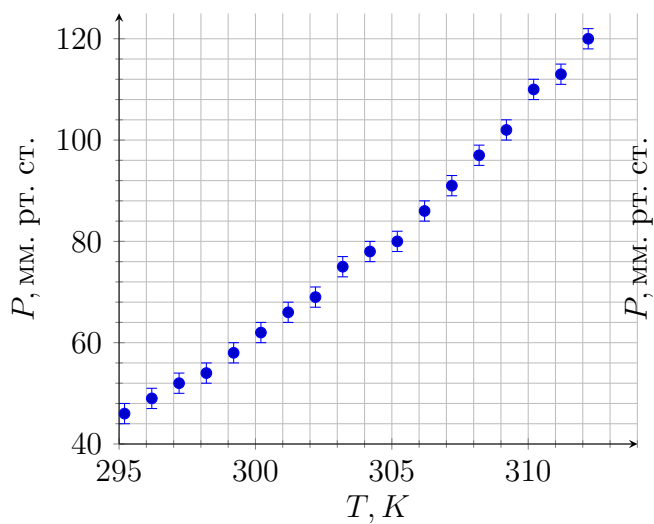
$T,$ $K$	$h_1,$ мм	$h_2,$ мм	$\Delta h,$ мм	$P,$ кПа	$\ln(\frac{P}{P_0})$	$1/T,$ $K^{-1} \cdot 10^{-4}$	$\sigma_P,$ %	$\sigma_{\frac{1}{T}},$ %	$\sigma_{\ln(\frac{P}{P_0})},$ %
295,2	32	81	49	6,5	3,89	33,88	4,1	0,07	1,1
296,2	31	82	51	6,8	3,93	33,76	3,9	0,07	1,0
297,2	30	84	54	7,2	3,99	33,65	3,7	0,07	0,9
298,2	28	85	57	7,6	4,04	33,53	3,5	0,07	0,9
299,2	26	86	60	8,0	4,09	33,42	3,3	0,07	0,9
300,2	24	89	65	8,7	4,17	33,31	3,1	0,07	0,8
301,2	23	90	67	8,9	4,20	33,21	3,0	0,07	0,7
302,2	22	93	71	9,5	4,26	33,09	2,8	0,07	0,7
303,2	19	95	76	10,1	4,33	32,98	2,6	0,07	0,6
304,2	17	98	81	10,8	4,39	32,87	2,5	0,07	0,6
305,2	15	100	85	11,3	4,44	32,77	2,4	0,07	0,6
306,2	13	102	89	11,9	4,49	32,66	2,2	0,07	0,5
307,2	11	104	93	12,4	4,53	32,55	2,2	0,07	0,5
308,2	8	107	99	13,2	4,60	32,45	2,0	0,07	0,5
309,2	4	111	107	14,3	4,67	32,34	1,9	0,07	0,4
310,2	2	114	112	14,9	4,72	32,24	1,8	0,07	0,4
311,2	3	120	117	16,0	4,76	32,14	1,7	0,07	0,4
312,2	1	123	122	16,4	4,80	32,03	1,6	0,07	0,4

### 4.3 Обработка результатов измерений



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

Изобразим данные отдельно на двух графиках. Согласно теории 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. Полученные результаты выпишем в таблицы под графиками. Далее найдём среднее значение теплоты испарения.



T, K	P, кПа	$\frac{dP}{dT}$ , Па/К	L, кДж/кг
296,2	6,5	356	847
297,2	6,9	385	891
298,2	7,2	414	854
299,2	7,7	443	854
300,2	8,3	472	852
301,2	8,8	502	868
302,2	9,2	531	896
303,2	10,0	560	924
304,2	10,4	589	930
305,2	10,7	618	927
306,2	11,5	648	931
307,2	12,1	677	935
308,2	12,9	706	939
309,2	13,6	735	934
310,2	14,7	764	904
311,2	15,1	794	920

Зависимость при увеличении  
температуры

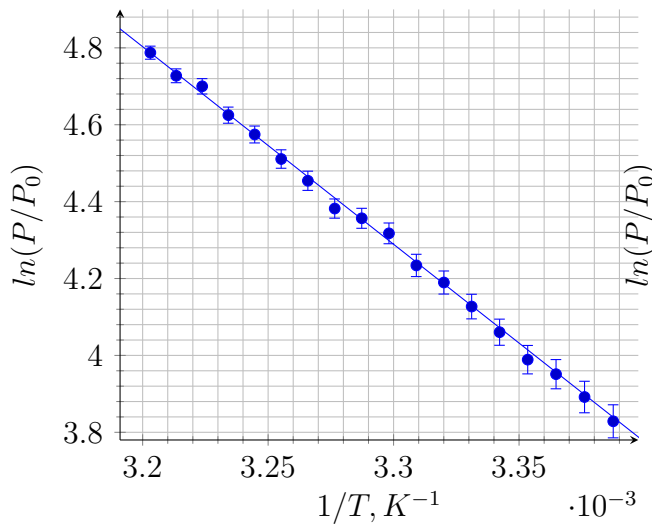
T, K	P, кПа	$\frac{dP}{dT}$ , кПа/К	L, кДж/кг
296,2	6,8	363	846
297,2	7,2	392	870
298,2	7,6	421	916
299,2	8,0	451	912
300,2	8,7	480	859
301,2	8,9	509	938
302,2	9,5	539	936
303,2	10,1	568	904
304,2	10,8	597	925
305,2	11,3	627	933
306,2	11,9	656	934
307,2	12,4	685	842
308,2	13,2	714	841
309,2	14,3	744	888
310,2	14,9	773	902
311,2	16,0	802	877

Зависимость при уменьшении  
температуры

$$L = 900 \pm 126 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \varepsilon = 14\%$$

$$L = 892 \pm 131 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \varepsilon = 15\%$$

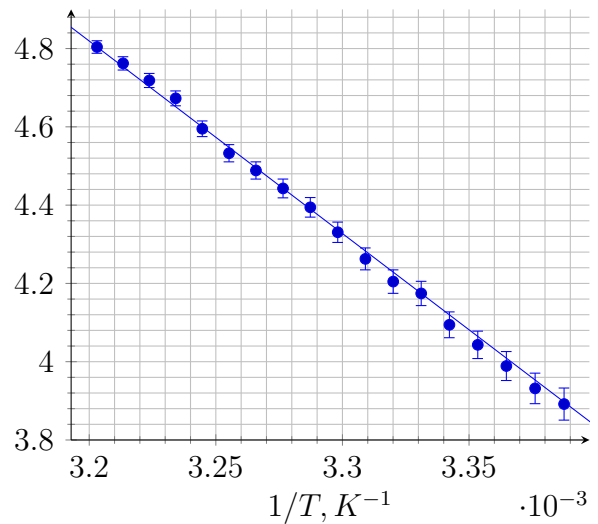
$$\frac{\Delta L}{L} = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_1^n \left( 4 \left( \frac{\Delta T}{T} \right)^2 + \left( \frac{\Delta P}{P} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \frac{dP}{dT}}{\frac{dP}{dT}} \right)^2 \right) + \frac{1}{N^2} \sum_1^n (L - \bar{L})^2 + \sigma_{\text{эксп}}^2}$$



Зависимость при нагревании

$$\frac{\ln(P/P_0)}{1/T} \approx -4980K$$

$$L = 898 \pm 81 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \varepsilon = 9\%$$



Зависимость при охлаждении

$$\frac{\ln(P/P_0)}{1/T} \approx -4920K$$

$$L = 888 \pm 79 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad \varepsilon = 9\%$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_1^n (L - \bar{L})^2 + \sigma_{\text{эсп}}^2}$$

## 5 Выводы

Из проделанного эксперимента можно понять, что полученные значения совпадают с табличными с точностью около 5%, однако, из-за того, что исследуемая жидкость не является чистым спиртом, и в ней скорее всего находится большая массовая доля воды и других спиртов, данная точность удивительна.

Заметим, что первый способ обработки гораздо менее точен, чем второй, так как подсчет производных поточечно вносит большую погрешность, сильно влияющую на конечный результат.

Так же заметны небольшие различия в значениях разности уровней столбиков при одинаковых температурах при нагревании и охлаждении. Возможно проявляется эффект необратимости термодинамических процессов. Однако данный "гистерезис" не сильно влияет на результат, судя по полученным значениям.

Так же в эксперименте наблюдалось наличие небольшого столбика ртути в одном из колен, его влияние на разность давлений незначительно мало, так как его высота равна приблизительно 2 мм, что в точке с наименьшей разностью столбиков оказывает 3% ошибку, а с наибольшей – меньше 1%.

Влияние мениска ртути на разность давлений тоже учитывать не будем, так как измерения проводились от одного края мениска в каждом случае.