

Лабораторная работа №2.4.1  
Определение теплоты испарения жидкости

Гёлецян А.Г.

22 июля 2022 г.

**Цель работы:** 1) измерение давления насыщенного пара жидкости при разной температуре; 2) вычисление по полученным данным теплоты испарения с помощью уравнения Клапейрона-Клаузиуса.

**В работе используются:** термостат, герметический сосуд, заполненный водой, отсчётный микроскоп.

## 1 Теоретическая часть

### 1.1 Уравнение Клапейрона-Клаузиуса

Если считать что насыщенные пары подчиняются закона Менделеева-Клапейрона, и пренебречь удельным объемом жидкости относительно удельного объема паров то из уравнения Клапейрона-Клаузиуса получаем формулу для удельной теплоты испарения

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

Как видим, если измерить зависимость давления насыщенных паров от температуры по формуле (1) можно получить удельную теплоту испарения.

### 1.2 Экспериментальная установка

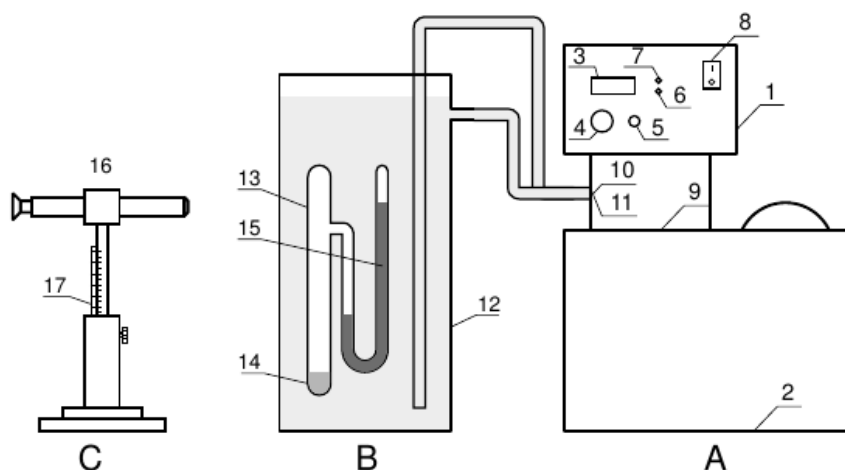


Рис. 1: Установка для определения давления насыщенных паров.

Измерения проводятся на установке, изображенной на рис. 1. С помощью термостата А выставляется желаемая температура, и с помощью микроскопа С измеряется положение менисков ртути в U-образном манометре 15. Давление насыщенных паров считается как разность высот менисков ртути.

Измерения проводятся в 2 этапа. В начале жидкость нагревается, а потом остужается. Это делается для того, чтобы посмотреть зависит ли давление насыщенных паров только от состояния жидкости или нет.

## 2 Измерения

Измеряем давление по вышеописанной схеме в диапазоне температур от 22 до 37 °C. Получаем следующие данные

№	$T, ^\circ C$	$h_1, \text{см}$	$h_2, \text{см}$	H	№	$T, ^\circ C$	$h_1, \text{см}$	$h_2, \text{см}$	H
0	24.09	7.900	5.950	1	12	36.06	9.045	4.930	1
1	25.08	7.990	5.895	1	13	37.05	9.175	4.720	1
2	26.06	8.050	5.840	1	14	38.00	9.290	4.720	1
3	27.05	8.125	5.765	1	15	35.86	9.090	4.895	0
4	28.07	8.195	5.695	1	16	33.94	8.880	5.085	0
5	29.08	8.305	5.595	1	17	32.00	8.680	5.280	0
6	30.06	8.390	5.520	1	18	29.97	8.455	5.475	0
7	31.04	8.500	5.445	1	19	28.00	8.290	5.610	0
8	32.07	8.610	5.340	1	20	26.00	8.130	5.770	0
9	33.04	8.700	5.250	1	21	24.01	7.970	5.890	0
10	34.06	8.815	5.150	1	22	21.88	7.770	6.085	0
11	35.04	8.910	5.040	1					

Таблица 1: Измеренные положения менисков в зависимости от температуры.

В таблице (1)  $h_1$  и  $h_2$  это координаты правого и левого мениска соответственно относительно некоторой точки. Для ошибок измерения имеем следующее

$$\Delta h = 0.005 \text{ см}$$

$$\Delta T = 0.01 \text{ K}$$

Заметим, что ошибка температуры  $\Delta T$  это ошибка в значениях термометра, который измеряет температуру воды в термостате. Температура воды в балоне может отличаться от температуры воды в ванне. Столбец  $N$  равен 1 если измерение проводилось в цикле нагрева и 0 если в цикле охлаждения.

Если посмотреть на данные внимательно, можно заметить что  $h_1 + h_2$  не остается константой, что на первый взгляд может показаться странным, и может намекнуть на недостаточную точность в эксперименте. Для исследования этого вопроса построим график зависимости  $h_1 + h_2$  от  $h_1$ .

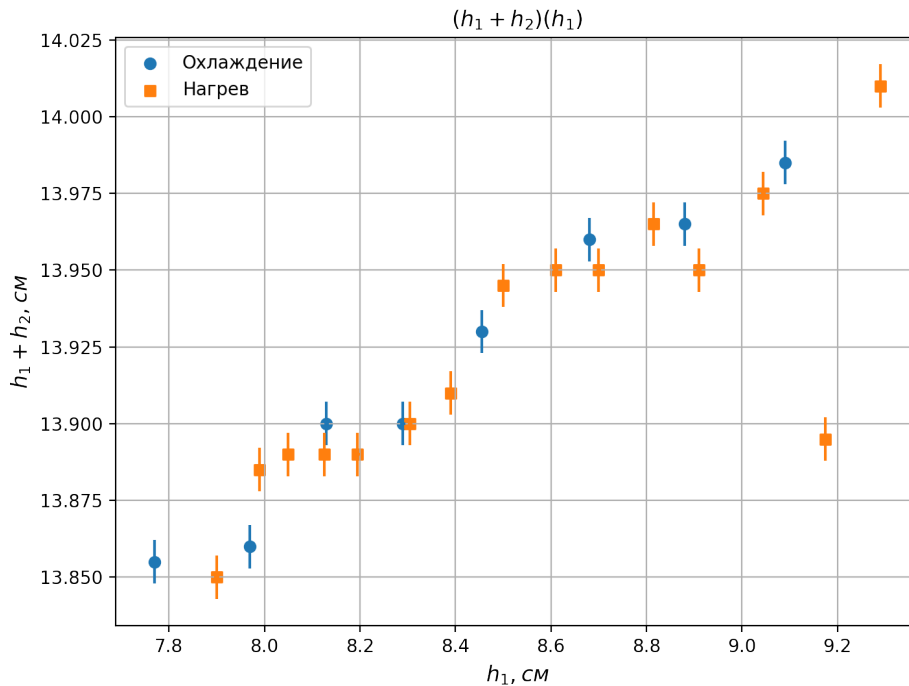


Рис. 2: Зависимость  $(h_1 + h_2)(h_1)$ .

Как видим, при нагреве и охлаждении при близких значениях  $h_1$   $h_1 + h_2$  почти равны. Это свидетельствует о том, что все таки точности в эксперименте хватает, и изменение  $h_1 + h_2$  скорее является следствием других факторов, а не результатом неточных измерений. Единственная странная точка это точка №13, но во всем остальном все хорошо.

Теперь, когда разобрались с этим вопросом, считаем давление паров при разных температурах.

№	$T, ^\circ C$	$P, \text{торр}$	Н	№	$T, ^\circ C$	$P, \text{торр}$	Н
0	24.09	19.50	1	12	36.06	41.15	1
1	25.08	20.95	1	13	37.05	44.55	1
2	26.06	22.10	1	14	38.00	45.70	1
3	27.05	23.60	1	15	35.86	41.95	0
4	28.07	25.00	1	16	33.94	37.95	0
5	29.08	27.10	1	17	32.00	34.00	0
6	30.06	28.70	1	18	29.97	29.80	0
7	31.04	30.55	1	19	28.00	26.80	0
8	32.07	32.70	1	20	26.00	23.60	0
9	33.04	34.50	1	21	24.01	20.80	0
10	34.06	36.65	1	22	21.88	16.85	0
11	35.04	38.70	1				

Таблица 2: Измеренные давления в зависимости от температуры.

Из графика видно, что синие точки смещены влево, что свидетельствует о том, что во время цикла охлаждения на релаксацию системы не было уделено достаточно времени. Действительно, во время опыта температура жидкости поднималась на  $1^\circ C$  примерно каждые 7-10 минут, в то время как жидкость охлаждалась на  $2^\circ C$  примерно каждые 2-4 минут.

Теперь, для нахождения теплоты испарения построим график зависимости  $\ln(P)(1/T)$ . В предположении что теплота испарения не зависит от температуры эта зависимость имеет вид прямой, а теплота испарения считается по формуле (1). Как видим на рис. 4, для оранжевых точек линейная зависимость довольно хорошая, в отличие от синих точек. Объяснение этому дано выше. Аппроксимируя оранжевые, синие и зеленые точки методом МНК имеем следующее

$$\left( \frac{d(\ln P)}{d(1/t)} \right)_{\text{охл.}} = (-5780 \pm 360)K \quad (2)$$

$$\left( \frac{d(\ln P)}{d(1/t)} \right)_{\text{нагр.}} = (-5750 \pm 90)K \quad (3)$$

$$\left( \frac{d(\ln P)}{d(1/t)} \right)_{\text{реал.}} = (-5279 \pm 6)K \quad (4)$$

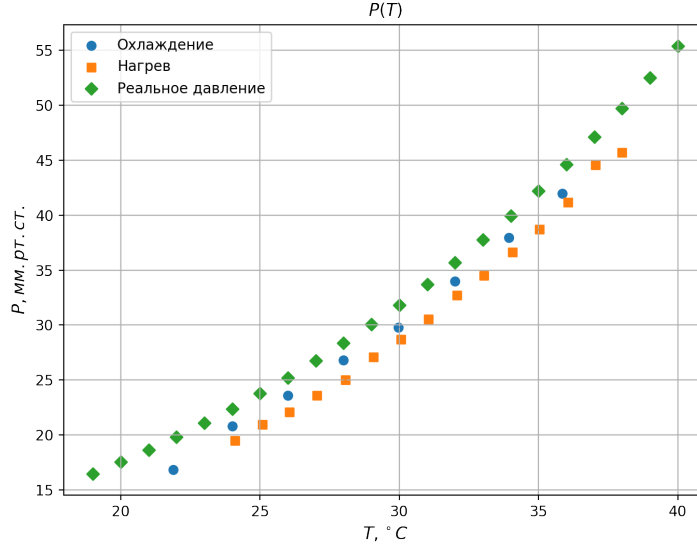


Рис. 3: Зависимость давления насыщенных паров от температуры.

Как видим, в цикле охлаждения ошибки большие, поэтому теплоту испарения будем считать для цикла нагревания. Получаем

$$L = (2650 \pm 40) \text{ кДж/кг} \quad (5)$$

$$L_{\text{реал.}} = (2437 \pm 3) \text{ кДж/кг} \quad (6)$$

### 3 Выводы

Сравним наши данные с табличными. При  $100^\circ\text{C}$  теплота испарения  $L_{100^\circ\text{C}} = 2256 \text{ кДж/кг}$ . Как видим, различия большие. Теперь сравним с теплотой испарения при  $30^\circ\text{C}$  -  $L_{30^\circ\text{C}} = 2430 \text{ кДж/кг}$ . Как видим, довольно близко к  $L_{\text{реал.}}$ , что свидетельствует о том что на нашем диапазоне температур формулой (1) можно пользоваться. Несмотря на это, мы получили значение  $L$ , которое отличается от действительного на  $\varepsilon_L = 9\%$ , что не входит в диапазон погрешности  $L$ . Причиной всему этому скорее всего является недостаточное время отведенное для релаксации системы, из-за чего действительная температура в баллоне ниже регистрируемой. Именно в следствии этих искажений мы и получаем ошибочное значение  $L$ .

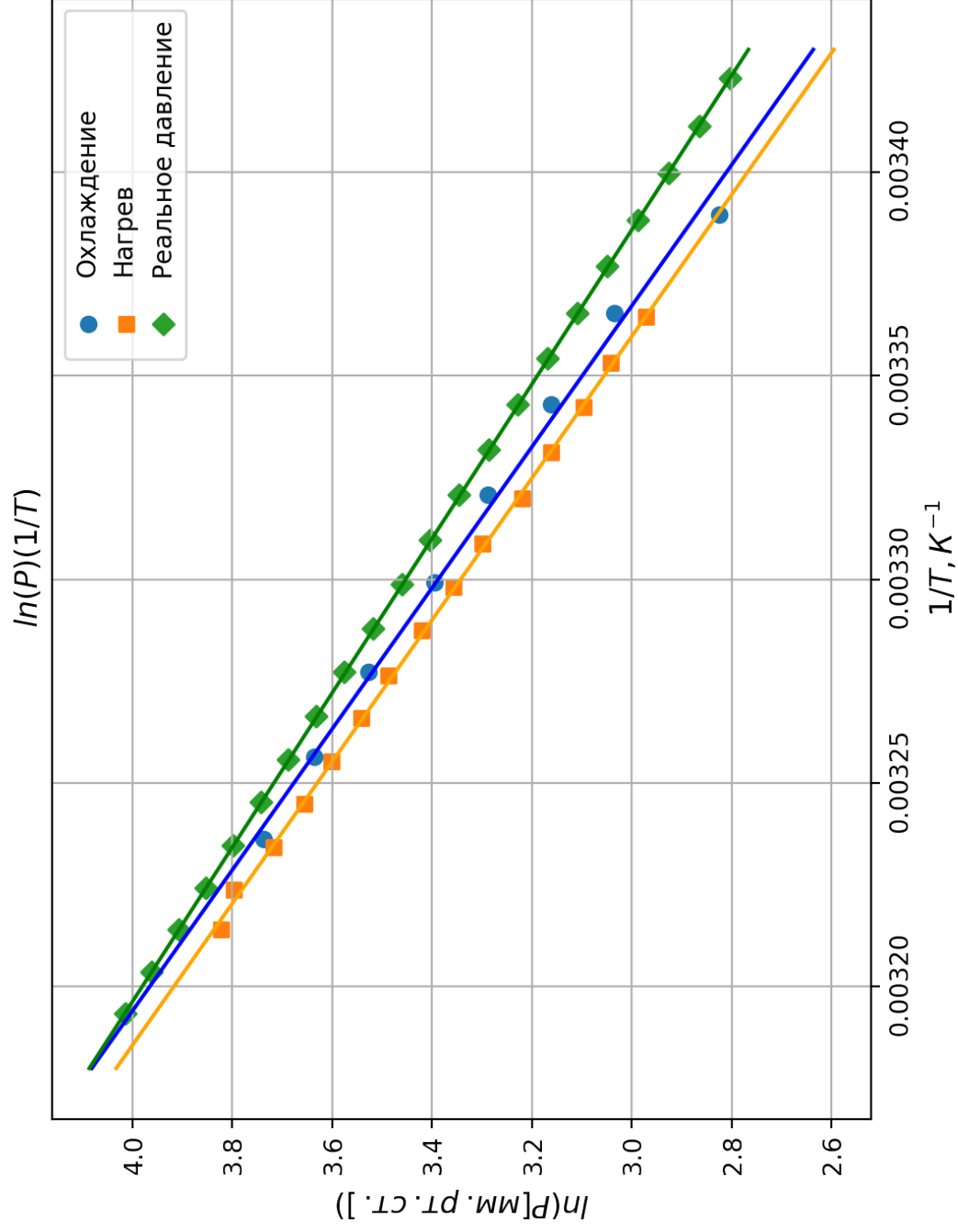


Рис. 4: Зависимость  $\ln(P)(1/T)$ .