

«Московский физико-технический институт»
Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

Отчёт о лабораторной работе №<2.4.1> «Измерение теплоты испарения жидкости»

Выполнил:
Хмельницкий А. А., БО1-306
Консультант:
Волков Л.С.

1 Аннотация

Цель работы:

1. Измерение давления насыщенного пара жидкости при разной температуре;
2. Вычисление по полученным данным теплоты испарения с помощью уравнения Клапейрона-Клаузиуса.

Оборудование:

термостат, герметический сосуд, заполненный водой, отсчётный микроскоп.

2 Теоретические сведения

Испарением называется переход вещества из жидкого в газообразное состояние. Оно происходит на свободной поверхности жидкости. При испарении с поверхности вылетают молекулы, образуя над ней пар. Для выхода из жидкости молекулы должны преодолеть силы молекулярного сцепления. Кроме того, при испарении совершается работа против внешнего давления P , поскольку объем жидкости меньше объема пара. Не все молекулы жидкости способны совершить эту работу, а только те из них, которые обладают достаточной кинетической энергией. Поэтому переход части молекул в пар приводит к обеднению жидкости быстрыми молекулами, т. е. к ее охлаждению. 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 (парообразования).

Около тройной точки теплота сублимации q_s равна сумме теплоты плавления q_m и испарения q_e , поэтому кривая сублимации идет круче, чем линия испарения. Теплоту парообразования жидкостей можно измерить непосредственно при помощи калориметра. Такой метод, однако, не позволяет получить точных результатов из-за неконтролируемых потерь тепла, которые трудно сделать малыми. В настоящей работе для определения теплоты испарения применен косвенный метод, основанный на формуле Клапейрона-Клаузиуса:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)} \quad (1)$$

Здесь P – давление насыщенного пара жидкости при температуре T , T – абсолютная температура жидкости и пара, L – теплота испарения жидкости, V_2 – объем пара, V_1 – объем жидкости. Найдя из опыта dP/dT , T , V_2 и V_1 , можно определить L путем расчета. Величины L , V_2 и V_1 в формуле (1) должны относиться к одному и тому же количеству вещества; мы будем относить их к одному молю.

Из таблицы в приложении следует видно, что величина V_1 не превышает 0,5% от V_2 . Для нашей точности эксперимента этой величиной можно пренебречь.

Обратимся теперь к V_2 , которое в дальнейшем будем обозначать V . Объем V связан с давлением и температурой уравнением Ван-дер-Ваальса:

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

Из рассмотрения таблицы в приложении следует, что b одного порядка с V_1 . В уравнении Ван-дер-Ваальса величиной b следует пренебречь. Пренебрежение членом a/V^2 по сравнению с P вносит ошибку менее 3%. При давлении ниже атмосферного ошибки становятся еще меньше. Таким образом, при давлениях ниже атмосферного уравнение Ван-дер-Ваальса для насыщенного пара мало отличается от уравнения Клапейрона. Положим поэтому

$$P = \frac{RT}{V} \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1) и разрешая уравнение относительно L , получаем:

$$L = \frac{RT^2}{\mu P} \frac{dP}{dT} = -\frac{R}{\mu} \frac{d(\ln P)}{d(1/T)} \quad (4)$$

Эта формула является окончательной.

В нашем эксперименте температура жидкости определяется термометром, давление пара определяется с помощью манометра, а производные $\frac{dP}{dT}$ и $\frac{d(\ln P)}{d(1/T)}$ можно найти из углового коэффициента касательной к графику $P(T)$ или как коэффициент наклона прямой на графике с осями $\ln P$ и $1/T$.

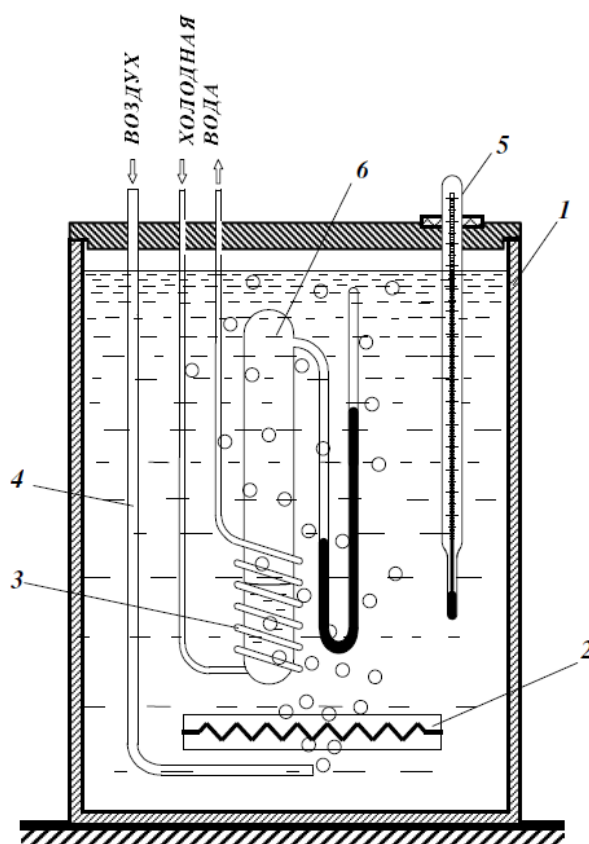


Рисунок 1: Схема установки для определения давления насыщенных паров.

Экспериментальная установка 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.

3 Результаты эксперимента

T, K	Δh , мм	$\Delta P \pm 9 * 10^{-3}$, кПа
296	45	6,120
298	47	6,392
300	50,6	6,882
302	53,76	7,311
304	58,1	7,902
306	62,13	8,450
308	66,51	9,045
310	72,78	9,898
312	78	10,608
313	81	11,016

T, K	Δh , мм	$\Delta P_0 \pm 9 * 10^{-3}$, кПа
296	45,4	6,174
298	49,6	6,746
300	52,1	7,085
302	55,9	7,602
304	59,3	8,064
306	64,2	8,731
308	69	9,384
310	74,39	10,117
312	79	10,744
313	81	11,016

4 Обработка результатов

3) Построим график зависимости $P(T)$

Используя полученные результаты найдем формулу дифференцирования давления по температуре:

$$\frac{dP}{dT} = abe^{bT}$$

Из формулы выше и формулы (4) получим формулу для вычисления теплоты парообразования спирта

$$L = \frac{RT^2 ab}{P} e^{bT}$$

Из коэффициента наклона получаем

$$L = (730 \pm 0.5) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

4) Построим график зависимости $\ln P(1/T)$ для нагрева и охлаждения

5) Полученные значения для нагрева

$$\frac{d \ln P}{dT} = (-5007 \pm 7)$$

и охлаждения

$$\frac{d \ln P}{dT} = (-4675 \pm 8)$$

$$\left(\frac{d \ln P}{dT}\right)_{sr} = (-4882 \pm 7)$$

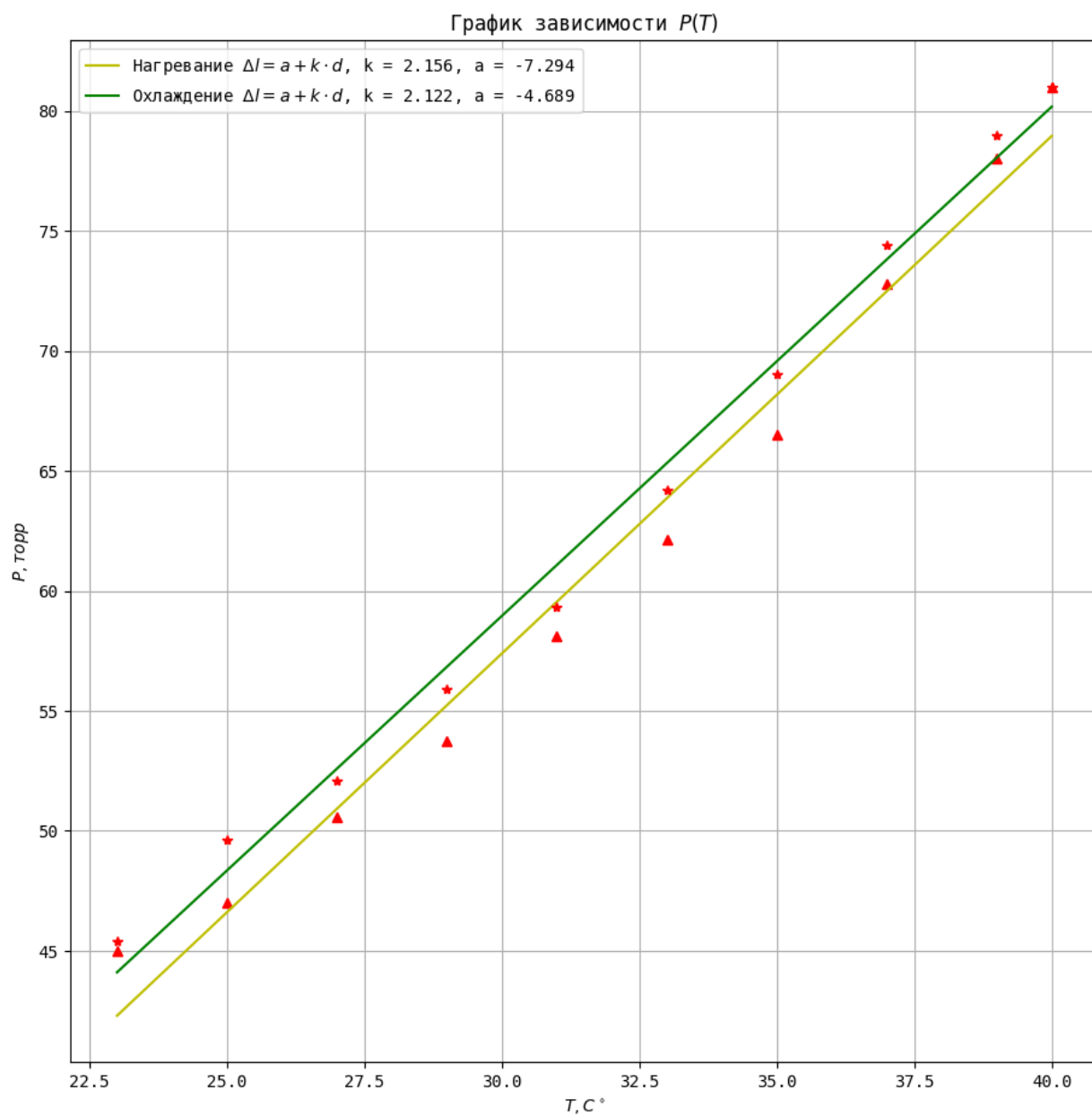
6) Из результатов видно, что наиболее точный метод измерения - при нагревании, воспользуемся полученным значением и подставим в формулу 4:

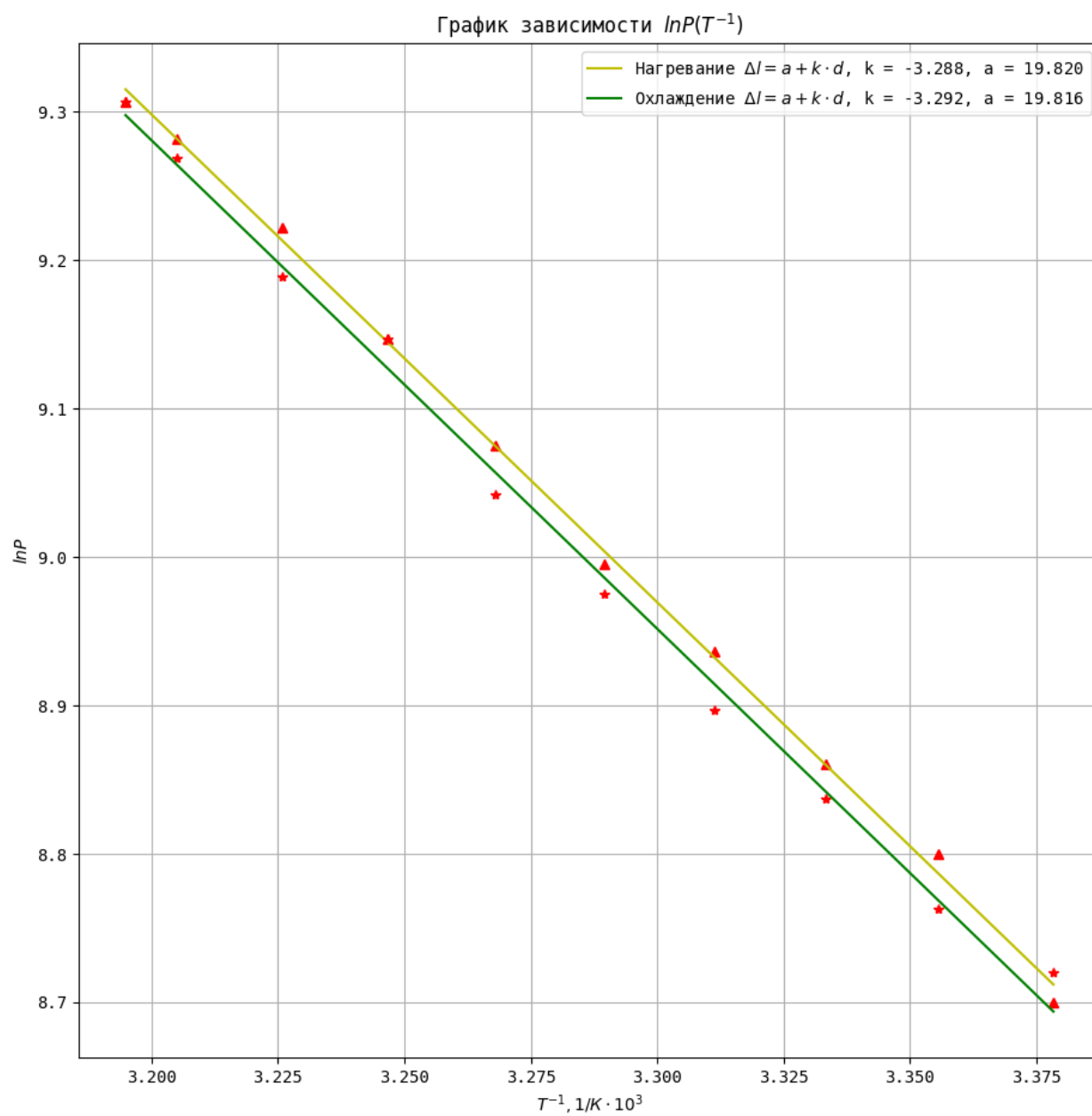
$$L = (881 \pm 0.5) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Реальное значение: $L = 900 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

5 Выводы

Сравним наши данные с табличными. При 100°C теплота испарения $L_{100^\circ\text{C}} = 900 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. Как видно расчет через угол наклона графика $P(T)$ менее точен $\varepsilon = 18\%$. В то время как у угла наклона графика $\ln P(T^{-1})$ точность $\varepsilon = 2\%$. Также отметим, что точность при взятии угла наклона при нагревании более точна, чем при охлаждении.

Рисунок 2: $P(T)$

Рисунок 3: $\ln P(T)$ при нагревании