

# Определение теплоты испарения жидкости (2.4.1)

Иван Едигарьев,<sup>1</sup> 526т

<sup>1</sup>Факультет Общей и Прикладной Физики,  
Московский Физико-Технический Институт

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 исследуемой жидкостью; отсчётный микроскоп.

## Теория

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).

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.

В нашем приборе измерения производятся при давлениях ниже атмосферного. В этом случае задача существенно упрощается.

В таблице для ряда жидкостей приведены: температура, при которой давление насыщенных паров равно атмосферному, величины  $V_2$  и  $V_1$ , входящие в (1), а также константы  $a$  и  $b$  в уравнении Ван-дер-Ваальса.

Substance	$T_{boil},$ $K$	$V_1,$ $10^{-6}$ $m^3/mol$	$V_2,$ $10^{-3}$ $m^3/mol$	$b,$ $10^{-6}$ $m^3/mol$	$a,$ $Pam^6/mol^2$	$a/V_2^2,$ $kPa$
Water	373	18	31	26	0.4	0.42
$CCl_4$	350	97	29	126	1.95	2.3
Ethyl	307	104	25	137	1.8	2.9
Ethanol	351	58	29	84	1.2	1.4

Из таблицы видно, что  $V_1$  не превосходит 0,5% от  $V_2$ . При нашей точности опытов величиной  $V_1$  в (1) можно пренебречь.

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

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

Из рассмотрения таблицы 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

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

Подставляя (3) в (1), пренебрегая  $V_1$  и разрешая уравнение относительно  $L$ , найдем

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

Эта формула является окончательной.

В нашем опыте температура жидкости измеряется термометром, давление пара определяется при помощи манометра, а производные  $dP/dT$  или  $d(\ln P)/d(1/T)$  находятся графически как угловой коэффициент касательной к кривой  $P(T)$  или соответственно к кривой, у которой по оси абсцисс отложено  $1/T$ , а по оси ординат  $\ln P$ .

## Экспериментальная установка

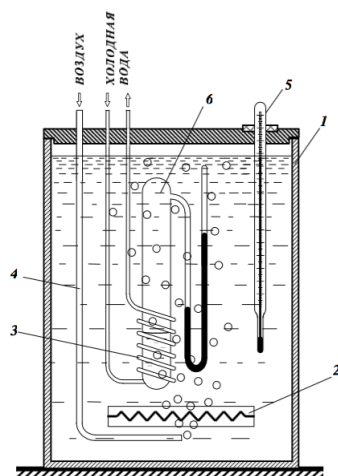


Рис. 1. Схема установки для определения теплоты испарения

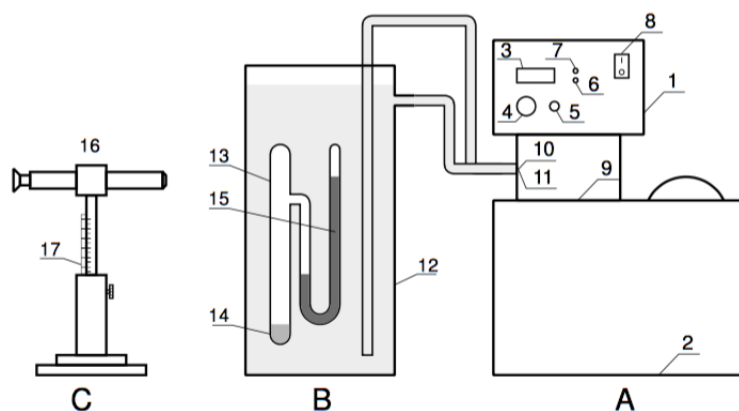


Рис. 2. Схема установки для определения теплоты испарения

Экспериментальная установка. Схема установки изображена на рисунке 1. 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.

На рисунке 2 приведена более полная схема такой же установки, но с использованием современного термостата. Установка включает термостат А, экспериментальный прибор В и отсчетный микроскоп С. На рисунке 2 работы 2.2.6 приведен внешний вид термостата. Там же описан порядок работы с ним.

Экспериментальный прибор В представляет собой емкость 12, заполненную водой. В нее погружен запаянный прибор 13 с исследуемой жидкостью 14. Перед заполнением исследуемой жидкостью воздух из запаянного прибора был удален, так что над жидкостью находится только её насыщенный пар. Давление пара определяется по ртутному манометру 15, соединенному с емкостью 13. Численная величина давления измеряется по разности показаний отсчетного микроскопа 16, настраиваемого последовательно на нижний и верхний уровни столбика ртути манометра. Показания микроскопа снимаются по шкале 17.

Описание прибора указывает на второе важное преимущество предложенного косвенного метода измерения  $L$  перед прямым. При непосредственном измерении теплоты испарения опыты нужно производить при неизменном давлении, и прибор не может быть запаян. При этом невозможно обеспечить такую чистоту и неизменность экспериментальных условий, как при нашей постановке опыта.

Описываемый прибор обладает важным недостатком: термометр определяет температуру термостата, а не исследуемой жидкости (или ее пара). Эти температуры близки друг к другу лишь в том случае, если нагревание происходит достаточно медленно. Убедиться в том, что темп нагревания не является слишком быстрым, можно, сравнивая результаты, полученные при нагревании и при остывании прибора. Такое сравнение необходимо сделать. Для ориентировки укажем, что температуру воды в калориметре следует менять не быстрее, чем на  $1^{\circ}\text{C}$  в течение 1–3 минут.

## Ход работы и задание

1. Измерьте разность уровней в ртутном U-образном манометре с помощью микроскопа и температуру по термометру или индикаторному табло.
2. Включите термостат. Если вы работаете со схемой рис. 1, то подогревайте воду

в калориметре, пропуская ток через нагреватель. Следите за тем, чтобы воздух все время перемешивал воду.

Продолжайте повышать температуру в течение половины имеющегося у вас времени, чтобы успеть произвести измерения при остывании прибора. Желательно нагреть жидкость до  $40^\circ - 50^\circ\text{C}$

3. Проведите те же измерения при охлаждении жидкости. Установите такой поток воды, чтобы охлаждение шло примерно тем же темпом, что и нагревание

4. Постройте графики в координатах  $T$ ,  $P$  и в координатах  $1/T$ ,  $\ln P$ . На графики нанесите точки, полученные при нагревании и охлаждении жидкости (разными цветами).

По формуле (4) вычислите  $L$ , пользуясь данными, полученными сначала из одного, а потом из другого графика. Находятся ли результаты в согласии друг с другом? Оцените ошибку измерений. Какой из графиков позволяет найти  $L$  с лучшей точностью?

# Измерения

1) Измерения на первой установке:

а) Длина трубы:  $L_{min} = 700 \text{ cm}$

Максимальное удлинение длины трубы:  $\Delta L = 23 \text{ cm}$

Комнатная температура:  $T_{room} = 285K$

Приблизительное вычисление диапазона частот в котором можно наблюдать

от 2 до 5 резонансов:  $[2 * c/2\Delta L; 5 * c/2\Delta L] = [1304, 3260] \text{ Hz}$

б) Измерения:

$CO_2$  :

$f, \text{Hz}$	$l_1, \text{cm}$	$l_2, \text{cm}$	$l_3, \text{cm}$	$l_4, \text{cm}$	$l_5, \text{cm}$
1300	3.8	14.7	—	—	—
1835	1.0	9.4	17.9	—	—
2244	1.5	8.1	15.1	22.0	—
3404	0.3	4.9	9.7	14.6	19.4

'—' - резонанс не наблюдался

Воздух:

$f, \text{Hz}$	$l_1, \text{cm}$	$l_2, \text{cm}$	$l_3, \text{cm}$	$l_4, \text{cm}$	$l_5, \text{cm}$
1300	8.6	21.6	—	—	—
2405	2.9	10.5	17.5	—	—
2841	3.5	9.6	15.6	21.8	—
3418	1.3	6.2	11.5	16.4	21.4

'—' - резонанс не наблюдался

2) Измерения на второй установке:

а) Длина трубы:  $L = 800$  см

б) Измерения:

$T, K$	$f_{\lambda/2}, Hz$	$f_{\lambda}, Hz$	$f_{3\lambda/2}, Hz$	$f_{2\lambda}, Hz$	$f_{5\lambda/2}, Hz$	$f_{3\lambda}, Hz$	$f_{7\lambda/2}, Hz$	$f_{4\lambda}, Hz$
25.3	217	430	652	870	1090	1300	1516	1742
35.2	213	455	666	882	1040	1300	1508	1725
45.1	208	452	680	902	1130	1345	1580	1797
55.0	205	462	695	923	1144	1373	1590	1826

## Обработка и Результаты

1) а) Отнормируем все измерения относительно первого:

$CO_2$  :

$f, Hz$	$\Delta l_{k=0}, cm$	$\Delta l_{k=1}, cm$	$\Delta l_{k=2}, cm$	$\Delta l_{k=3}, cm$	$\Delta l_{k=4}, cm$
1300	0.0	10.9	—	—	—
1835	0.0	8.4	16.9	—	—
2244	0.0	6.6	13.6	20.0	—
3404	0.0	4.6	9.4	14.3	19.1

'—' - резонанс не наблюдался

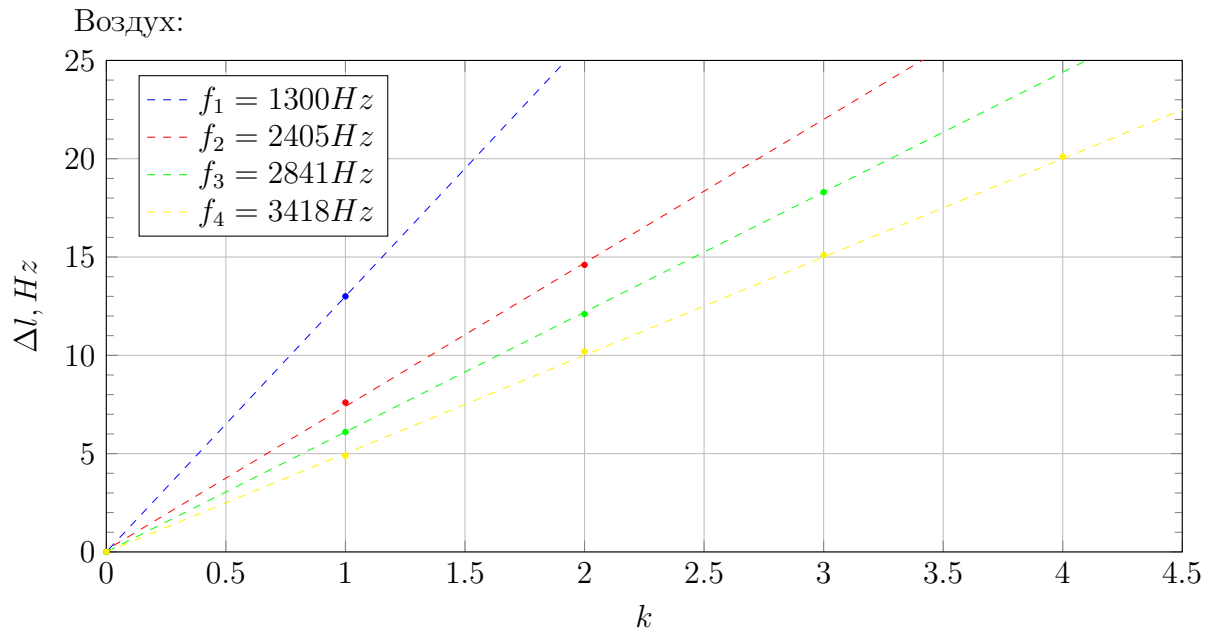
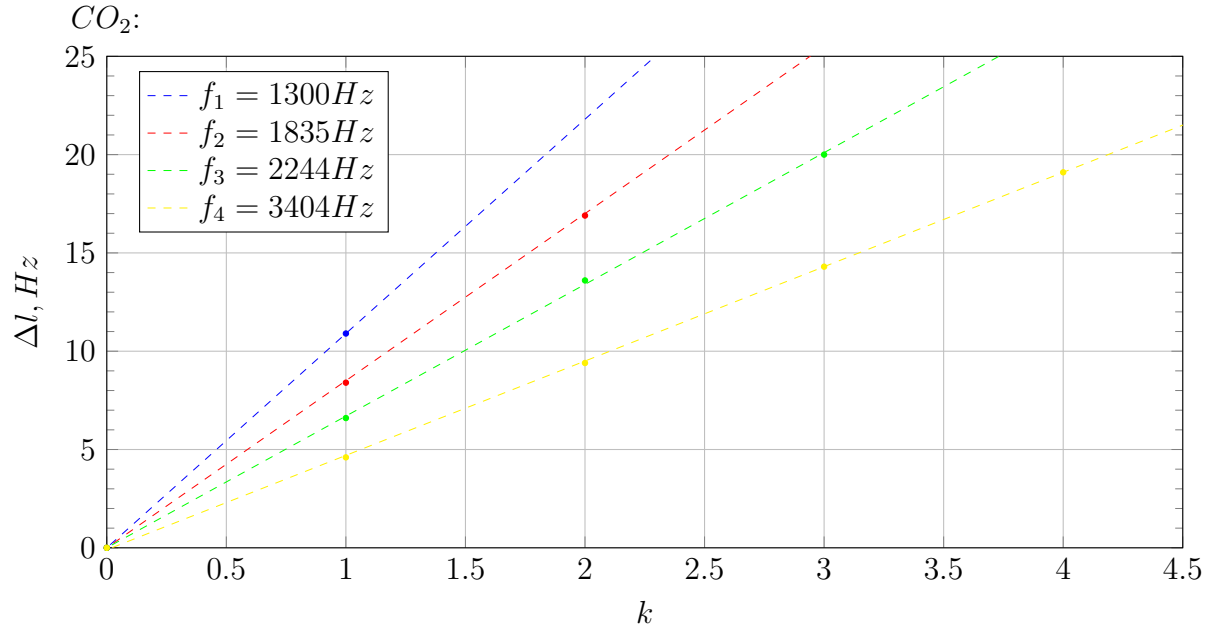
Воздух:

$f, Hz$	$\Delta l_{k=0}, cm$	$\Delta l_{k=1}, cm$	$\Delta l_{k=2}, cm$	$\Delta l_{k=3}, cm$	$\Delta l_{k=4}, cm$
1300	0.0	13.0	—	—	—
2405	0.0	7.6	14.6	—	—
2841	0.0	6.1	12.1	18.3	—
3418	0.0	4.9	10.2	15.1	20.1

'—' - резонанс не наблюдался



б) Построим графики для  $CO_2$  и воздуха. Далее применим регрессионный анализ и получим соответствующие значения весов для аппроксимирующей функции. На основе этих данных вычислим значения показателя адиабаты для каждой из частот.



$CO_2$ :

$f, Hz$	$w_0$	$w_1, Hz$	$\sigma_{w_0}$	$\sigma_{w_1}, Hz$	$\chi$	$\sigma_{\Delta l}, cm$	$\sigma_k$	$c, m/s$	$\sigma_c, m/s$	$\gamma$	$\sigma_\gamma$
1300	0.0	10.9	0.0	0.1	0.00	0.1	0	283	3	1.43	0.03
1835	0.0	8.5	0.1	0.1	0.01	0.1	0	312	4	1.74	0.05
2244	0.0	6.7	0.2	0.2	0.03	0.1	0	300	9	1.61	0.10
3404	-0.1	4.8	0.2	0.2	0.02	0.1	0	326	14	1.90	0.16

Воздух:

$f, Hz$	$w_0$	$w_1, Hz$	$\sigma_{w_0}$	$\sigma_{w_1}, Hz$	$\chi$	$\sigma_{\Delta l}, cm$	$\sigma_k$	$c, m/s$	$\sigma_c, m/s$	$\gamma$	$\sigma_\gamma$
1300	0.0	13.0	0.0	0.1	0.00	0.1	0	338	3	1.35	0.03
2405	0.1	7.3	0.0	0.1	0.01	0.1	0	268	5	0.85	0.04
2841	0.0	6.1	0.0	0.1	0.01	0.1	0	303	6	1.09	0.05
3418	0.0	5.0	0.0	0.1	0.01	0.1	0	342	7	1.38	0.06

Итоговый результат:

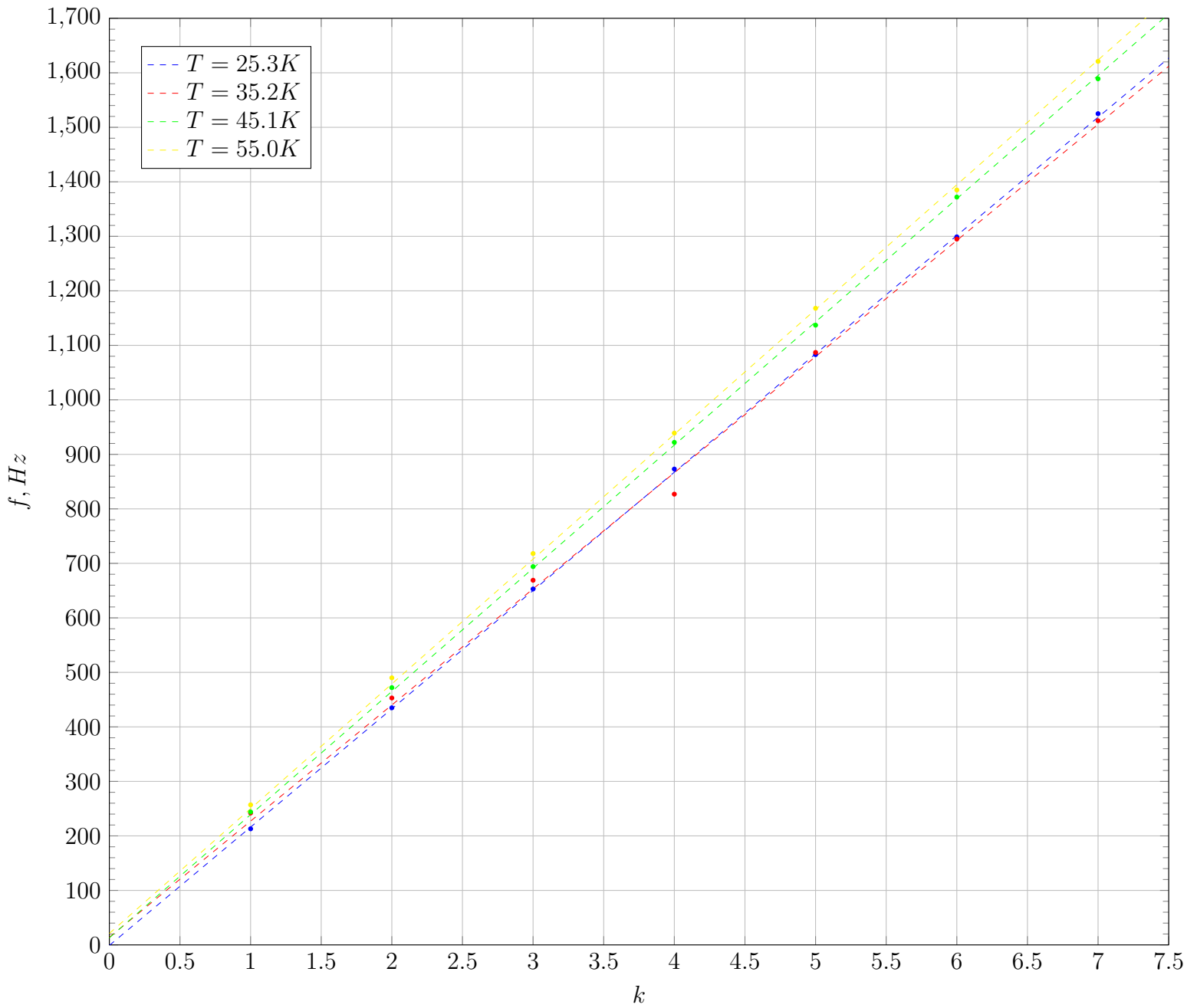
$$\gamma_{co_2} = (1.7 \pm 0.2)$$

$$\gamma_{air} = (1.2 \pm 0.1)$$

2) а) Аналогично отнормируем все измерения относительно первого:

$T, K$	$f_{k=0}$	$f_{k=1}, Hz$	$f_{k=2}, Hz$	$f_{k=3}, Hz$	$f_{k=4}, Hz$	$f_{k=5}, Hz$	$f_{k=6}, Hz$	$f_{k=7}, Hz$
25.3	0	213	435	653	873	1083	1299	1525
35.2	0	242	453	669	827	1087	1295	1512
45.1	0	244	472	694	922	1137	1372	1589
55.0	0	257	490	718	939	1168	1385	1621

б) Построим график. Далее аналогично применим регрессионный анализ и получим соответствующие значения весов для аппроксимирующей функции. На основе этих данных вычислим значения показателя адиабаты для каждой из температур.



$T, C$	$w_0$	$w_1, Hz$	$\sigma_{w_0}$	$\sigma_{w_1, Hz}$	$\chi$	$\sigma_f, Hz$	$\sigma_k$	$c, m/s$	$\sigma_c, m/s$	$\gamma$	$\sigma_\gamma$
25.3	-1	217	1	1	0.13	1	0	347	2	1.40	0.02
35.2	14	213	6	3	4.0	1	0	341	5	1.31	0.04
45.1	13	226	2	1	0.35	1	0	361	2	1.42	0.02
55.0	21	229	4	2	0.73	1	0	366	3	1.41	0.02

Итоговый результат:

$$\gamma = (1.4 \pm 0.2)$$