

Отчёт о выполнении лабораторной работы 2.1.1

Мещеряков Павел Б02-920

10 сентября 2020 г.

Измерение удельной теплоёмкости воздуха при постоянном давлении

Цель работы: измерить повышение температуры воздуха в зависимости от мощности подводимого тепла и расхода при стационарном течении через трубу; исключив тепловые потери, по результатам измерений определить теплоёмкость воздуха при постоянном давлении.

В работе используются: теплоизолированная стеклянная трубка; электронагреватель; источник питания постоянного тока; амперметр, вольтметр (цифровые мультиметры); термомпара, подключенная к микровольтметру; компрессор; газовый счётчик; секундомер.

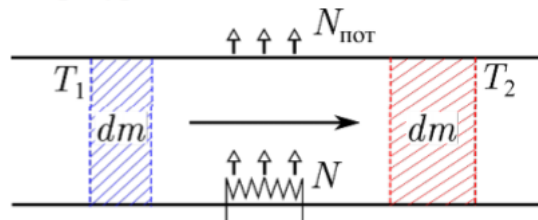
1 Теоретическое введение

Теплоёмкость тела в некотором процессе определяется как их отношение:

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad (1).$$

Необходимо, чтобы количество тепла, затрачиваемое на нагревание исследуемого тела, существенно превосходило тепло, расходуемое на нагревание самого калориметра, а также на потери тепла из установки.

Для увеличения количества нагреваемого газа при неизменных размерах установки в нашей работе исследуемый газ (воздух) продувается через калориметр, внутри которого установлен нагреватель. При этом измеряются мощность нагревателя, масса воздуха, протекающего в единицу времени (расход), и приращение его температуры.



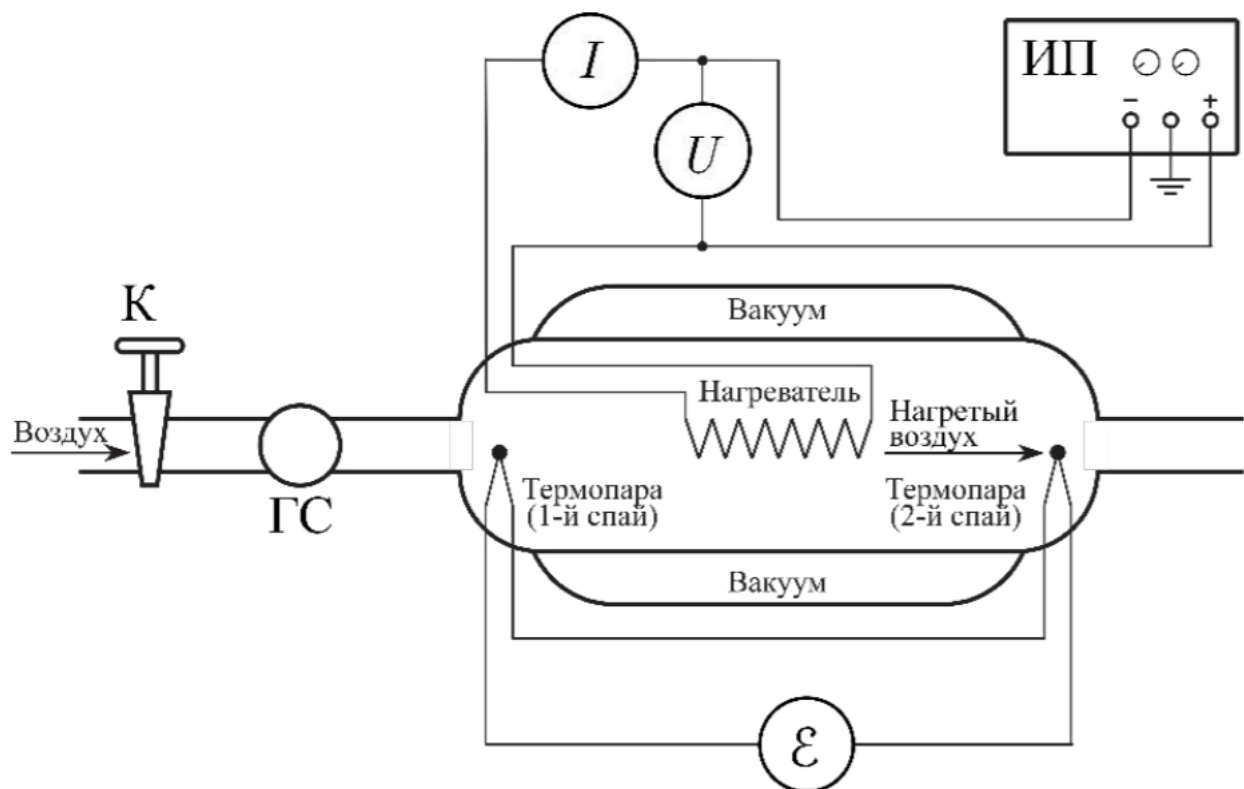
Рассмотрим газ, протекающий стационарно слева направо через трубу постоянного сечения, в которой установлен нагревательный элемент (см. рис. 1). Пусть за некоторое время dt через калориметр прошла малая порция газа массой $dm = qdt$, где q [кг/с] — массовый расход газа в трубе. Если мощность нагрева равна N , мощность тепловых потерь на обмен с окружающей средой $N_{\text{пот}}$, то порция получила тепло $\delta Q = (N - N_{\text{пот}})dt$. С другой стороны, по определению теплоёмкости (1): $\delta Q = cdm\Delta T$, где $\Delta T = T_2 - T_1$

— приращение температуры газа, и c — удельная (на единицу массы) теплоёмкость газа в рассматриваемом процессе. При малых расходах газа и достаточно большом диаметре трубы перепад давления на её концах мал, поэтому можно принять, что $P_1 \approx P_2 = P_0$, где P_0 — атмосферное давление. Следовательно, в условиях опыта измеряется удельная теплоёмкость при постоянном давлении c_P . Таким образом, получаем

$$c_P = \frac{N - N_{\text{пот}}}{q\Delta T} \quad (2).$$

1.1 Экспериментальная установка:

Схема установки изображена на рис. 2. Воздух, нагнетаемый компрессором, прокачивается через калориметр. Калориметр представляет собой стеклянную цилиндрическую трубку с двойными стенками, запаянными с торцов.



Нагреватель в виде намотанной на пенопласт нихромовой проволоки расположен внутри калориметра непосредственно в воздушном потоке. Нагрев проволоки производится от регулируемого источника постоянного тока (ИП). Напряжение U на нагревателе и ток I через него регистрируются цифровыми мультиметрами. Таким образом, мощность нагрева равна

$$N = UI \quad (3).$$

Для измерения разности температур ΔT служит медно-константановая термопара. Один спай термопары расположен в струе воздуха, входящего в калориметр, и находится при комнатной температуре, а второй — в струе выходящего нагретого воздуха. Константановая проволока термопары расположена внутри калориметра, а медные проводники подключены к цифровому вольтметру. Возникающая в термопаре ЭДС ε пропорциональна разности температур ΔT спаев:

$$\varepsilon = \beta \Delta T \quad (4),$$

где $\beta = 40.7 \frac{\text{мкВ}}{^\circ\text{C}}$ — чувствительность медно-константановой термопары в рабочем диапазоне температур (20–30 $^\circ\text{C}$). ЭДС регистрируется с помощью микровольтметра.

Объём воздуха, прошедшего через калориметр, измеряется газовым счётчиком ГС. Для регулировки расхода служит кран К. Время Δt прохождения некоторого объёма ΔV воздуха измеряется секундомером. Объёмный расход равен $\frac{\Delta V}{\Delta t}$, массовый расход может быть найден как

$$q = \rho_0 \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (5),$$

где ρ_0 — плотность воздуха при комнатной температуре, которая в свою очередь может быть получена из уравнения Менделеева–Клапейрона: $\rho_0 = \frac{\mu P_0}{RT_0}$, где P_0 — атмосферное давление, T_0 — комнатная температура (в Кельвинах), $\mu = 29,0 \text{ г/моль}$ — средняя молярная масса (сухого) воздуха.

Учитывая особенности устройства калориметра, следует ожидать, что мощность нагревателя расходуется не только на нагрев массы прокачиваемого воздуха, но и частично теряется за счет нагрева внутренних стенок термостата и рассеяния тепла через торцы термостата. Можно предположить, что при небольшом нагреве ($\Delta T \ll T_0$) мощность потерь тепла $N_{\text{пот}}$ прямо пропорциональна разности температур:

$$N_{\text{пот}} = \alpha \Delta T \quad (6),$$

где α — некоторая константа. При этом условии основное соотношение (2) принимает вид

$$N = (c_P q + \alpha) \Delta T \quad (7)$$

Следовательно, при фиксированном расходе воздуха ($q = \text{const}$) подводимая мощность и разность температур связаны прямой пропорциональностью ($\Delta T(N)$ — линейная функция).

1.2 Ход работы

1. Подготовим к работе газовый счетчик: проверим, что он заполнен водой, установим счетчик по уровню.
2. Охладим калориметр до комнатной температуры.
3. Включим вольтметр, предназначенный для измерения ЭДС термопары.
4. Запишем показания комнатной температуры и давления.

$$T_0 = 297.05 \text{ } ^\circ\text{C}, P_0 = 99325 \pm 13 \text{ Па}$$

5. С помощью газового счетчика и секундомера измерим максимальный расход воздуха $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ (в л/с). Измерения представлены в таблице 1. По найденным значениям определим среднее значение расхода и массовый расход воздуха q_{max} [г/с].

$$q = \rho_0 \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\mu P_0}{RT_0} \frac{\Delta V}{\Delta t}.$$

Относительная погрешность косвенных измерений может быть найдена по формуле

$$\frac{\sigma_{q_{\text{max}} \text{ кос}}}{q_{\text{max}}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{T_0}}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{P_0}}{P_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t}\right)^2}$$

| $\Delta V, \text{л}$ | $\Delta t, \text{с}$ | $\frac{\Delta V}{\Delta t}, \frac{\text{л}}{\text{с}}$ | $q_{max}, \frac{\text{г}}{\text{с}}$ | $\sigma_{q_{max} \text{кос}}, \frac{\text{г}}{\text{с}} \cdot 10^{-3}$ |
|----------------------|----------------------|--|--------------------------------------|--|
| 5 | 25.68 | 0.1947 | 0.2272 | 1.769 |
| 10 | 51.19 | 0.1953 | 0.2280 | 0.891 |
| 15 | 76.87 | 0.1951 | 0.2277 | 0.592 |
| 20 | 102.35 | 0.1954 | 0.2280 | 0.446 |
| 25 | 128.14 | 0.1951 | 0.2277 | 0.355 |
| 30 | 153.88 | 0.1950 | 0.2275 | 0.296 |
| 35 | 179.58 | 0.1949 | 0.2274 | 0.253 |

Таблица 1: Измерение расхода воздуха

$$\frac{\overline{\Delta V}}{\Delta t} = 0.1951 \frac{\text{л}}{\text{с}}, \quad \overline{q_{max}} = 0.2276 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

Случайная погрешность массового расхода может быть найдена по формуле:

$$\sigma_{q_{max} \text{сл}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 (q_{max,i} - \overline{q_{max}})^2}{6}} = 0.0003 \frac{\text{г}}{\text{с}}.$$

Косвенная погрешность для среднего значения: q_{max}

$$\sigma_{\overline{q_{max} \text{кос}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 (\sigma_{q_{max} \text{кос}})^2}{7^2}} = 0.0003 \frac{\text{г}}{\text{с}}.$$

Суммарная погрешность:

$$\sigma_{\overline{q_{max}}} = \sqrt{(\sigma_{q_{max} \text{сл}})^2 + (\sigma_{\overline{q_{max} \text{кос}}})^2} = 0.0004 \frac{\text{г}}{\text{с}}.$$

Окончательное значение:

$$q_{max} = 0.2276 \pm 0.0004 \frac{\text{г}}{\text{с}}$$

6. Оценим величину тока нагревателя I_0 , требуемого для нагрева воздуха на $\delta T = 1\text{К}$.

Определим теоретическое значение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении $C_{\text{теор}} \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{К}}$, считая воздух смесью двухатомных идеальных газов: $C_p = 3.5R \mu \approx 1 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{К}}$.

Оценим минимальную мощность N_0 , необходимую для нагрева газа при максимальном расходе. $N_0 = c_p q \Delta T \approx 0.227 \text{Вт}$.

Учитывая, что сопротивление проволоки нагревателя составляет приблизительно $R_n \approx 35 \text{Ом}$ и в процессе опыта практически не меняется, искомое значение тока $I_0 = q N_0 R_n \approx 0.08 \text{А}$.

7. Проведем измерение зависимости разности температур от мощности нагрева $\Delta T(N)$ при максимальном расходе воздуха $q_0 = q_{max}$. Следует отметить, что погрешность измерения тока: $\sigma_I = 0.01 \text{мА}$, а напряжения: $\sigma_U = 0.01 \text{В}$, $\sigma_\varepsilon = 1 \mu\text{В}$

Завершив первую серию измерения, охладим калориметр до комнатной температуры. Для этого отключим источник питания нагревателя, откроем кран К и продуем

| $I, \text{мА}$ | $U, \text{В}$ | $N, \text{Вт}$ | $R_{\text{н}}, \text{Ом}$ | $\varepsilon, \mu\text{В}$ | $\Delta T, \text{К}$ |
|----------------|---------------|----------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|
| 108.18 | 3.19 | 0.345 | 29.49 | 52 | 1.28 |
| 141.62 | 4.18 | 0.592 | 29.52 | 88 | 2.16 |
| 165.70 | 4.89 | 0.810 | 29.51 | 118 | 2.90 |
| 181.06 | 5.34 | 0.967 | 29.49 | 141 | 3.46 |
| 210.7 | 6.21 | 1.308 | 29.48 | 188 | 4.61 |

Таблица 2: Измерение $\Delta T(N)$ при q_{max}

| $\Delta V, \text{л}$ | $\Delta t, \text{с}$ | $\frac{\Delta V}{\Delta t}, \frac{\text{л}}{\text{с}}$ | $q_1, \frac{\text{г}}{\text{с}}$ | $Z, \frac{\text{г}}{\text{с}} \cdot 10^{-3}$ | $\Delta V, \text{л}$ | $\Delta t, \text{с}$ | $\frac{\Delta V}{\Delta t}, \frac{\text{л}}{\text{с}}$ | $q_2, \frac{\text{г}}{\text{с}}$ | $Z, \frac{\text{г}}{\text{с}} \cdot 10^{-3}$ |
|----------------------|----------------------|--|----------------------------------|--|----------------------|----------------------|--|----------------------------------|--|
| 5 | 46.02 | 0.1086 | 0.1266 | 0.550 | 1 | 13.40 | 0.0747 | 0.0870 | 1.30 |
| 10 | 91.4 | 0.1094 | 0.1275 | 0.279 | 2 | 27.56 | 0.0726 | 0.0846 | 0.61 |
| 15 | 134.78 | 0.1113 | 0.1297 | 0.192 | 3 | 41.31 | 0.0726 | 0.0846 | 0.41 |
| 20 | 178.96 | 0.1117 | 0.1302 | 0.146 | 4 | 54.95 | 0.0733 | 0.0855 | 0.31 |
| 25 | 221.14 | 0.1130 | 0.1317 | 0.119 | 5 | 69.05 | 0.0724 | 0.0844 | 0.24 |
| 30 | 266.36 | 0.1126 | 0.1312 | 0.099 | 6 | 82.24 | 0.0729 | 0.0850 | 0.21 |
| 35 | 311.83 | 0.1122 | 0.1308 | 0.084 | 7 | 96.18 | 0.0728 | 0.0848 | 0.18 |

Таблица 3: Измерения других расходов; $q_1 = 0.123 \pm 0.002 \frac{\text{г}}{\text{с}}$; $q_2 = 0.085 \pm 0.001 \frac{\text{г}}{\text{с}}$

калориметр при максимальном расходе воздуха до тех пор, пока показания ЭДС не достигнут нуля.

Данные представлены в таблице 2.

Проведем аналогичные измерения для других значений расхода воздуха. Новая температура $T_0 = 297.4^\circ\text{C}$. Данные представлены в таблице 3 и 4. ($Z \equiv \sigma_{q_{\text{max}} \cos}$). Погрешности рассчитаны аналогично q_{max} .

Погрешности будем считать по следующим формулам:

$$\sigma_{\Delta T} = \Delta T \frac{\sigma_{\varepsilon}}{\varepsilon}, \sigma_N = N \sqrt{\left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2} \approx N \frac{\sigma_U}{U}$$

После завершения опытов выключим источник питания нагревателя и мультиметры. Кран К откроем для максимального продува воздуха через калориметр.

8. Построим на одном графике зависимости $\Delta T(N)$ при разных значениях q .

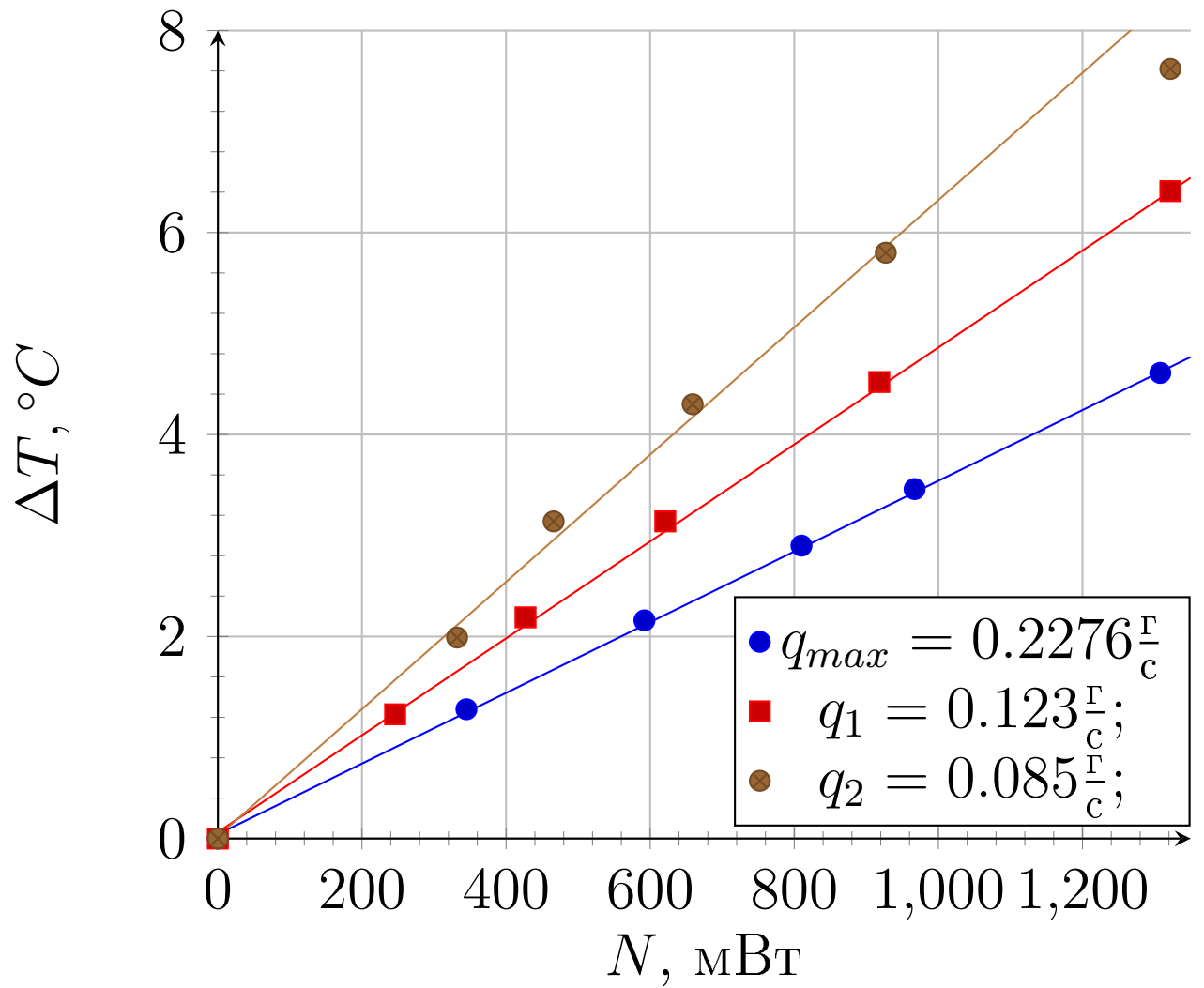
| $I, \text{А}$ | $U, \text{В}$ | $N, \text{Вт}$ | $R_{\text{н}}, \text{Ом}$ | $\varepsilon, \mu\text{В}$ | $\Delta T, \text{К}$ | $I, \text{А}$ | $U, \text{В}$ | $N, \text{Вт}$ | $R_{\text{н}}, \text{Ом}$ | $\varepsilon, \mu\text{В}$ | $\Delta T, \text{К}$ |
|---------------|---------------|----------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|---------------|---------------|----------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|
| 91.34 | 2.69 | 0.246 | 29.45 | 50 | 1.23 | 105.95 | 3.13 | 0.332 | 29.54 | 81 | 1.99 |
| 120.30 | 3.55 | 0.427 | 29.51 | 89 | 2.19 | 125.74 | 3.71 | 0.466 | 29.51 | 128 | 3.14 |
| 145.11 | 4.28 | 0.621 | 29.49 | 128 | 3.14 | 149.46 | 4.41 | 0.659 | 29.50 | 175 | 4.30 |
| 176.45 | 5.20 | 0.918 | 29.47 | 184 | 4.52 | 177.33 | 5.23 | 0.927 | 29.49 | 236 | 5.80 |
| 212.20 | 6.23 | 1.322 | 29.36 | 261 | 6.41 | 211.5 | 6.25 | 1.322 | 29.55 | 310 | 7.62 |

Таблица 4: Измерение $\Delta T(N)$ при q_1 и q_2

| $q, \frac{\text{r}}{\text{c}}$ | 0.2276 | | | | 0.123 | | | |
|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------------|
| k | $\Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_{\Delta T}, ^\circ\text{C}$ | $N, \text{мВт}$ | $\sigma_N, \text{мВт}$ | $\Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_{\Delta T}, ^\circ\text{C}$ | $N, \text{мВт}$ | $\sigma_N, \text{мВт}$ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1.28 | 0.02 | 345 | 1.1 | 1.23 | 0.02 | 246 | 0.9 |
| 2 | 2.16 | 0.02 | 592 | 1.4 | 2.19 | 0.02 | 427 | 1.2 |
| 3 | 2.90 | 0.02 | 810 | 1.7 | 3.14 | 0.02 | 621 | 1.5 |
| 4 | 3.46 | 0.02 | 967 | 1.8 | 4.52 | 0.02 | 918 | 1.8 |
| 5 | 4.61 | 0.02 | 1308 | 2.1 | 6.41 | 0.02 | 1322 | 2.1 |

| $q, \frac{\text{r}}{\text{c}}$ | 0.085 | | | |
|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------------|
| k | $\Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\sigma_{\Delta T}, ^\circ\text{C}$ | $N, \text{мВт}$ | $\sigma_N, \text{мВт}$ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1.99 | 0.02 | 332 | 1.1 |
| 2 | 3.14 | 0.02 | 466 | 1.3 |
| 3 | 4.30 | 0.02 | 659 | 1.5 |
| 4 | 5.80 | 0.02 | 927 | 1.8 |
| 5 | 7.62 | 0.02 | 1322 | 2.1 |

Таблица 5: погрешности, ΔT и N



$$y_{max} = (3.5 \pm 0.3)10^{-3}x + 0.042 \pm 0.027,$$

$$y_1 = (4.8 \pm 0.1)10^{-3}x + 0.062 \pm 0.044,$$

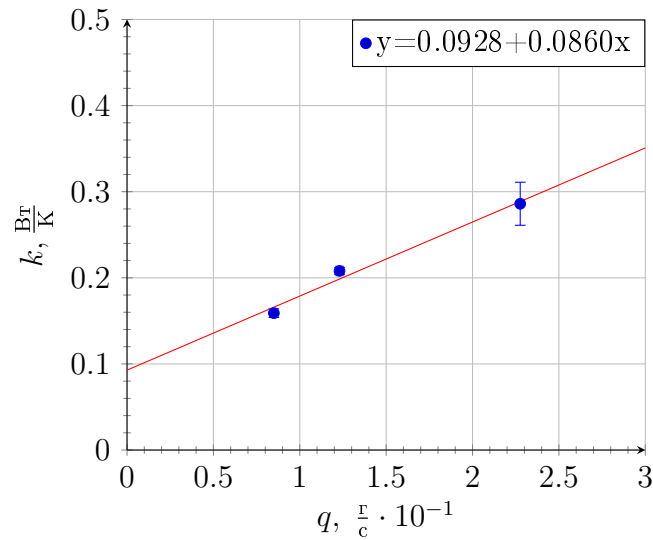
$y_2 = (6.3 \pm 0.2)10^{-3}x + 0.021 \pm 0.12$. Чтобы найти k_{max} , k_1 , k_2 , необходимо перевернуть соответствующие коэффициенты k' наклонов прямых, а погрешность считать по формуле:

$$\sigma_k = k^2 \sigma_{k'}.$$

$$k_{max} = 0.286 \pm 0.025 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}, k_1 = 0.208 \pm 0.004 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}, k_2 = 0.159 \pm 0.005 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

Прямая для расхода q_2 не идёт из нуля, вероятно, из-за поспешного начала третьей серии измерений (начальная температура была несколько больше комнатной). Однако в целом из вида наших прямых, можно сделать вывод о том, что тепловые потери пропорциональны разности температур.

Построим график зависимости $k(q)$ и по его наклону определим теплоёмкость воздуха при постоянном давлении c_p



Итак, из графика найдём $c_p = (0.86 \pm 0.1) \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{г}} \cdot 29 \frac{\text{г}}{\text{моль}} = 24.94 \pm 2.29 \frac{\text{Дж}}{\text{Кмоль}}$. А также $\alpha = 0.093 \pm 0.018 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$. К сожалению, теплоёмкость значительно отличается от теоретического значения $29.09 \frac{\text{Дж}}{\text{Кмоль}}$. Измерения необходимо было проводить более тщательно, ждать установления термодинамического равновесия более длительное время. Однако не смотря на это, результаты, полученные при обработке данных совпадают (почти) с теоретическими с учётом погрешностей.

Посчитаем доли тепловых потерь в опытах : $\frac{N_{\text{пот}}}{N} = \frac{\alpha}{k}$

| $q, \frac{\text{г}}{\text{с}}$ | $\frac{N_{\text{пот}}}{N}$ |
|--------------------------------|----------------------------|
| 0.085 | 0.59 ± 0.11 |
| 0.123 | 0.45 ± 0.09 |
| 0.2276 | 0.33 ± 0.06 |