

# Работа 2.1.1

## Измерение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении

Валеев Рауф Раушанович  
группа 825

25 февраля 2019 г.

### Цель работы

1. измерение повышения температуры воздуха в результате подвода тепла при стационарном течении через стеклянную трубу;
2. Вычисление при постоянном давлении теплоемкости воздуха.

### Введение

#### Теоретическая справка

Измерение теплоёмкости тел обычно производится в калориметрах, т.е. в сосудах, обеспечивающих теплоизоляцию исследуемого тела от внешней среды. При этом регистрируется изменение его температуры  $\delta T$  в зависимости от количества тепла  $\delta Q$ , полученного телом от некоторого нагревательного элемента внутри калориметра. Теплоёмкость тела в некотором процессе определяется как их отношение:

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

Надёжность измерения определяется, в основном, качеством калориметра. Необходимо, чтобы количество тепла, затрачиваемое на нагревание исследуемого тела, существенно превосходило тепло, расходуемое на нагревание самого калориметра, а также на потери тепла из установки. При измерении теплоёмкости газов эти требования выполнить довольно трудно - масса газа в калориметре и, следовательно, количество тепла, идущее на его нагревание, как правило, малы. 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

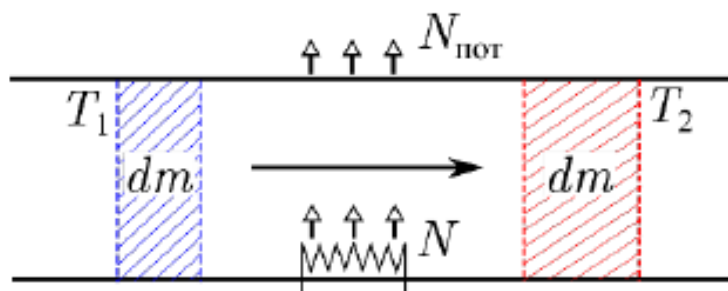


Рис. 1: Нагрев газа при течении по трубе

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

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

## Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рис. 1. Воздух, нагнетаемый компрессором, прокачивается через калориметр. Калориметр представляет собой стеклянную цилиндрическую трубку с двойными стенками, запаянными с торцов. На внутреннюю поверхность стенок трубки нанесено серебряное покрытие для минимизации потерь тепла за счет излучения. Воздух из пространства между стенками калориметра откачан до высокого вакуума ( $10^{-5}$  торр) для минимизации потерь тепла, обусловленных теплопроводностью.

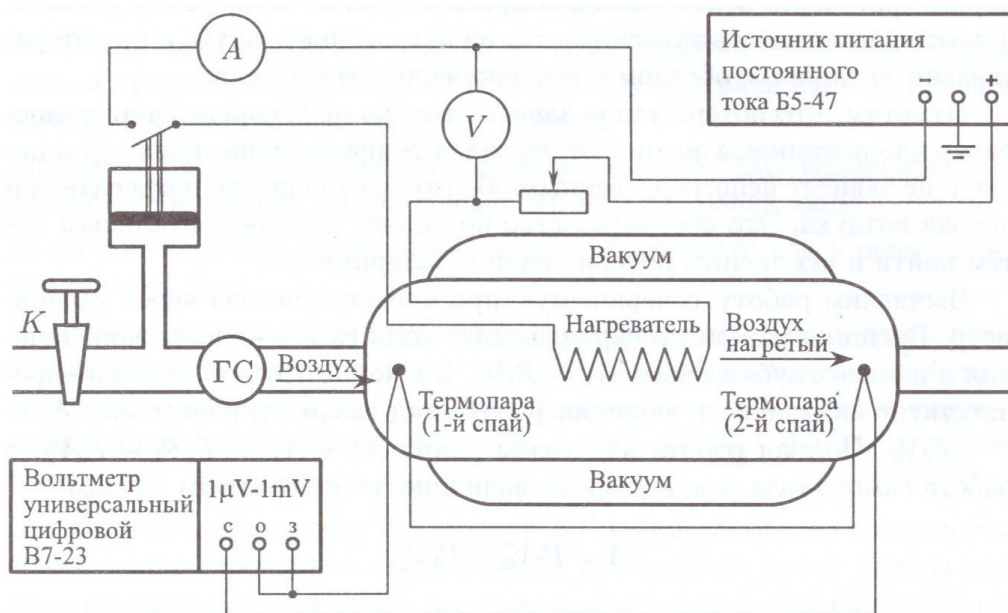


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

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  $\Delta T$  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  $\varepsilon$  пропорциональна разности температур  $\Delta T$  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  $\Delta t$  прохождения некоторого объема  $\Delta V$  воздуха измеряется секундомером. Объёмный расход равен  $\Delta V / \Delta t$ , массовый расход может быть найден как

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

где  $\rho_0$  - 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),  $\mu = 29,0$  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  $\alpha$  — 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).

## Ход работы

### Подготовка к эксперименту

1. подготавливаем к работе газовый счетчик: проверяем, заполнен ли он водой, устанавливаем счетчик по уровню.

- Начинать измерения следует при условии, что калориметр охлажден до комнатной температуры. Для охлаждения включаем компрессор и открывая кран К, устанавливаем максимально возможный расход воздуха. **Источник постоянного тока при этом выключен!** Для проверки корректности работы газового счетчика стоит убедиться, что при постоянном расходе его стрелка вращается равномерно.
- Включаем вольтметр, предназначенный для измерения ЭДС термопары. Если показания вольтметра отличны от нуля, продуваем калориметр воздухом до полного охлаждения калориметра (т.е. до установления нуля на цифровом дисплее вольтметра).
- Запишем значения температуры и давления в комнате, необходимые для расчета расхода прокачиваемого воздуха. По психрометру определяем значение влажности воздуха в комнате.

	Значение	$\sigma$
$p$ , Па	98340	1
$T$ , °C	25,2	0,1
$\varphi$	71%	1%

- С помощью газового счетчика и секундомера измерьте максимальный расход воздуха  $\Delta V/\Delta t$  (в л/с). Измерения проведите несколько раз и определите среднее значение расхода. Вычислите соответствующий массовый расход воздуха  $q_{max} \approx 0,095$  г/с, пользуясь формулой (5).

$\rho$ , г/л	$\sigma_\rho$ , г/л	$C_{p\ theor}, \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{К}}$
1,1502	0,0005	1

1					
$\Delta V$ , л	$\sigma_V$ , л	$\Delta t$ , с	$\sigma_t$ , с	$q_{max(1)}$ , г/с	$\sigma_q$ , г/с
5	0,1	60,6	0,5	0,095	0,002
5	0,1	61,2	0,5	0,094	0,002
5	0,1	60,8	0,5	0,095	0,002

2					
$\Delta V$ , л	$\sigma_V$ , л	$\Delta t$ , с	$\sigma_t$ , с	$q_{max(1)}$ , г/с	$\sigma_q$ , г/с
2	0,1	70,7	0,5	0,033	0,002
2	0,1	68,1	0,5	0,034	0,002
3	0,1	103,8	0,5	0,033	0,002

3					
$\Delta V$ , л	$\sigma_V$ , л	$\Delta t$ , с	$\sigma_t$ , с	$q_{max(1)}$ , г/с	$\sigma_q$ , г/с
1	0,1	60,6	0,5	0,019	0,002
1	0,1	61,7	0,5	0,019	0,002
1	0,1	60,3	0,5	0,019	0,002

- Оцениваем величину тока нагревателя  $I_0$ , требуемого для нагрева воздуха на  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ . Для этого определяем теоретическое значение удельной теплоёмкости воздуха при постоянном давлении  $c_{p\ theor}$  [Дж/г·К], считая воздух смесью двухатомных идеальных газов; оцениваем минимальную мощность  $N_0 \approx (0,095 \pm 0,003)$  Вт ( $N \geq$

$c_p q \Delta T$ ), необходимую для нагрева газа при максимальном расходе  $q_{max}$  на  $\Delta T_0 = 1^\circ C$ ; учитывая, что сопротивление проволоки нагревателя составляет приблизительно  $R_H \approx 35$  Ом и в процессе опыта практически не меняется, определяем искомое значение тока

$$I_0 = \sqrt{\frac{N_0}{R_H}} \approx (52 \pm 2) \text{ mA}$$

## Проведение измерений

7. Проведите измерение зависимости разности температур от мощности нагрева  $\Delta T(N)$  при максимальном расходе воздуха  $q_1 = q_{max}$ . Рекомендуется измерить 4-5 точек в диапазоне температур  $\Delta T$  от  $\approx 2^\circ C$  до  $\approx 10^\circ C$ .

7.1 Чтобы начать нагрев, включаем источник питания (ИП) нагревателя и устанавливаем на нём такое напряжение, чтобы ток через нить нагревателя составлял  $I_1 \sim (2 \div 2,5)I_0$  (см. п. 6). Записываем значения тока  $I$  и напряжения  $U$  в цепи. Рассчитайте мощность  $N$  нагрева, а также сопротивление нити нагревателя  $R_n$ .

7.2 После включения нагрева (или после изменения его мощности) ждём установления стационарного состояния системы. Первоначальный прогрев калориметра происходит достаточно долго ( $\sim 10$  минут). Значения ЭДС  $\varepsilon$  вольтметра, подключенного к термопаре, должны оставаться постоянными (в пределах точности прибора) в течение 1-2 минут.

7.3 По величине  $\varepsilon$  определите значение  $\Delta T$  (см. (4)). Учитывая, что  $\Delta T \propto N \propto I^2$ , определяем значения токов накала, необходимые для того, чтобы равномерно повышать температуру нагрева  $\Delta T$  до требуемого значения. Проводим измерения согласно пп. 7.1.-7.2, последовательно увеличивая ток нагрева до расчётных значений.

8. Повторяем измерения по п. 7 по крайней мере ещё для одного значения расхода воздуха.

$q_1 = (0,095 \pm 0,002), \text{ г/с}$					
$I, \text{ мА}$	88,21	98,69	128,38	150,3	174,03
$\sigma_I, \text{ мА}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$U, \text{ В}$	3,081	3,448	4,488	5,257	6,09
$\sigma_U, \text{ В}$	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$\Delta U_{thermopara}, \text{ мкВ}$	116	142	217	287	382
$\sigma_{\Delta U_{thermopara}}, \text{ мкВ}$	1	1	1	1	1
$R, \text{ Ом}$	34,93	34,94	34,96	34,98	34,99
$\sigma_R, \text{ Ом}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$N, \text{ Вт}$	0,2717	0,3403	0,5761	0,7901	1,0598
$\sigma_N, \text{ Вт}$	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
$\Delta T, \text{ К}$	2,85	3,49	5,33	7,05	9,39
$\sigma_{\Delta T}, \text{ К}$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

$q_2 = (0,033 \pm 0,001), \text{ г/с}$					
$I, \text{ мА}$	42,64	55,77	65,1	99,74	110
$\sigma_I, \text{ мА}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$U, \text{ В}$	1,5	1,968	2,297	3,522	3,854
$\sigma_U, \text{ В}$	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$\Delta U_{thermopara}, \text{ мкВ}$	105	122	157	320	380
$\sigma_{\Delta U_{thermopara}}, \text{ мкВ}$	1	1	1	1	1
$R, \text{ Ом}$	35,18	35,28	35,31	35,04	35,29
$\sigma_R, \text{ Ом}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$N, \text{ Вт}$	0,064	0,1098	0,15	0,3513	0,4239
$\sigma_N, \text{ Вт}$	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
$\Delta T, \text{ К}$	2,58	3	3,86	7,86	9,33
$\sigma_{\Delta T}, \text{ К}$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

$q_3 = 0,019 \pm 0,001, \text{ г/с}$			
$I, \text{ мА}$	40,75	51	71,93
$\sigma_I, \text{ мА}$	0,01	0,01	0,01
$U, \text{ В}$	1,427	1,786	2,523
$\sigma_U, \text{ В}$	0,001	0,001	0,001
$\Delta U_{thermopara}, \text{ мкВ}$	115	150	250
$\sigma_{\Delta U_{thermopara}}, \text{ мкВ}$	1	1	1
$R, \text{ Ом}$	35,02	35,02	35,08
$\sigma_R, \text{ Ом}$	0,01	0,01	0,01
$N, \text{ Вт}$	0,058	0,091	0,181
$\sigma_N, \text{ Вт}$	0,0015	0,0015	0,0015
$\Delta T, \text{ К}$	2,82	3,69	6,14
$\sigma_{\Delta T}, \text{ К}$	0,02	0,02	0,02

## Обработка результатов измерений

9. Строим графики зависимости  $\Delta T(N)$  для каждого расхода воздуха  $q$ . Проверяем, выполняется ли предположение о том, что тепловые потери пропорциональны разности температур. Аппроксимируя зависимость прямой  $y = kx$ , найдите угловые коэффициенты  $k$  для каждого расхода.

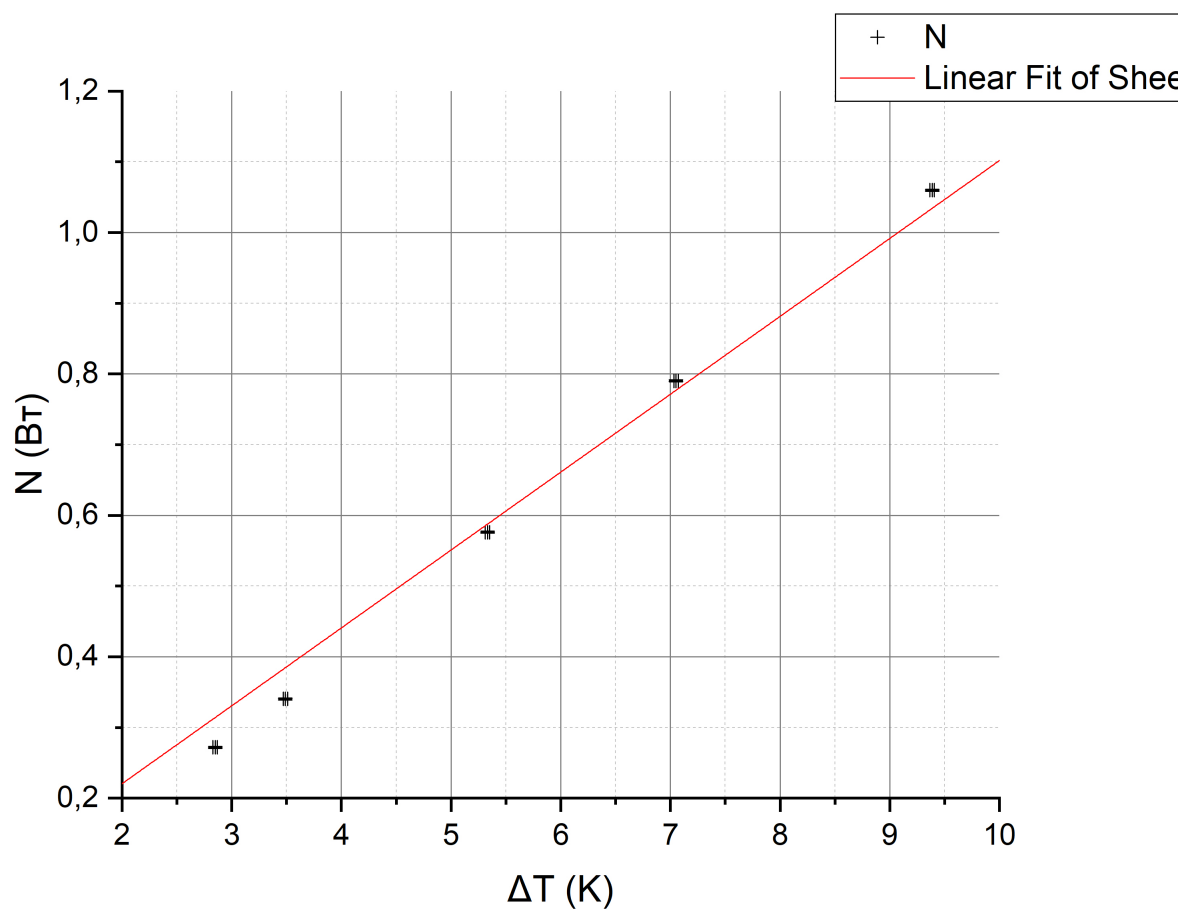


График для  $q_1$

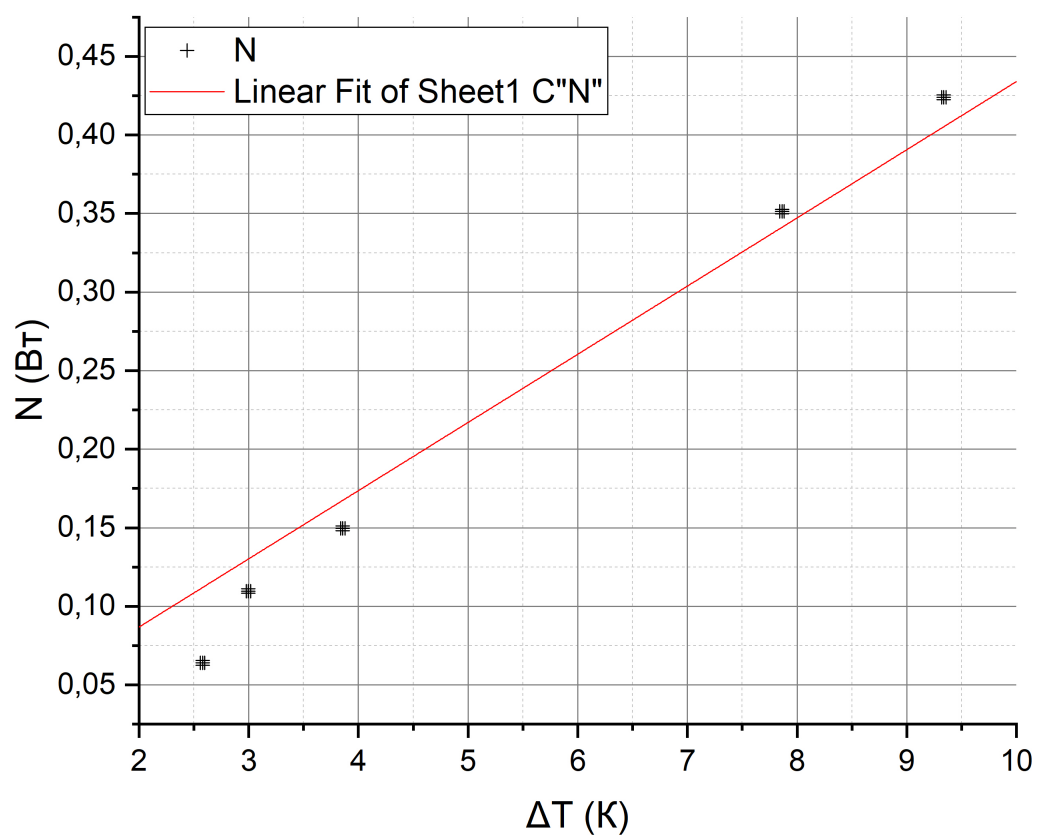


График для  $q_2$



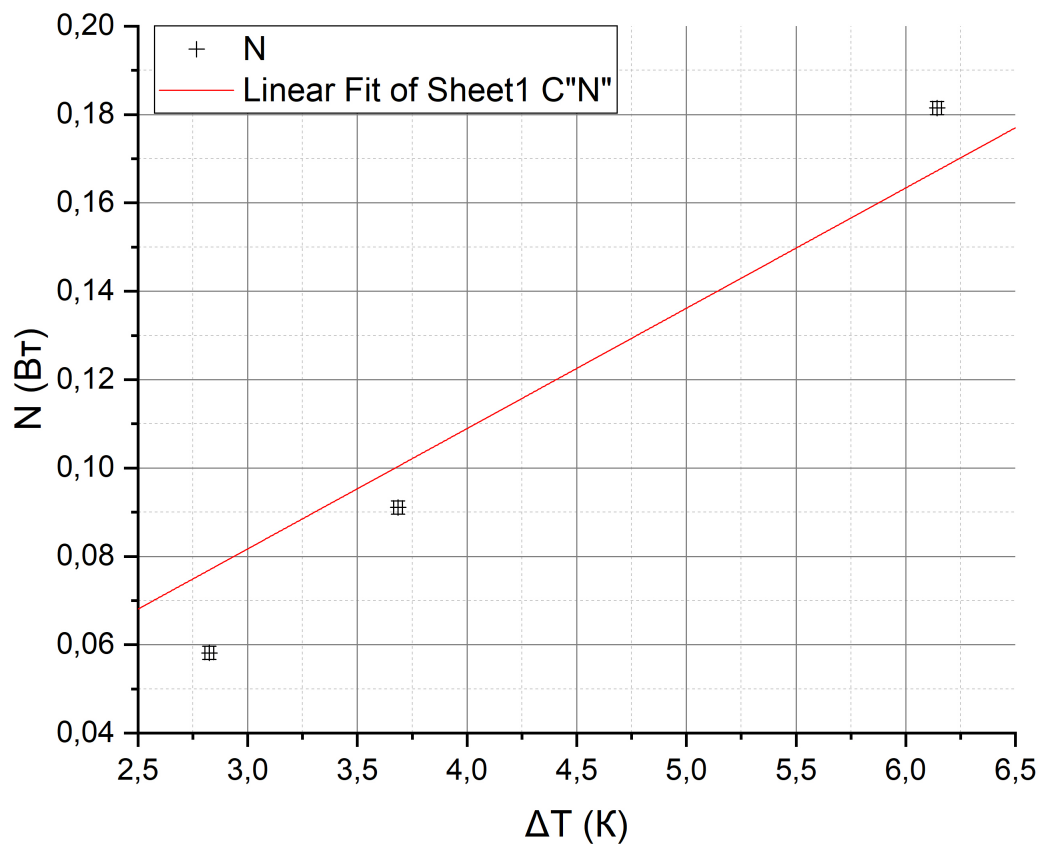


График для  $q_3$

10. Анализируем зависимость наклона  $k$  от расхода  $q$  и, пользуясь формулой (7), определяем  $c_p \approx (3,81 \pm 0,3)R$  Дж/(моль  $\cdot$  К),  $N_{\text{пот}}/N \approx (0,007 \pm 0,0015)$ .

$k$ , Вт/К	$\sigma_k$ , Вт/К	$q$ , г/с	$\sigma_q$ , г/с
0,11	0,006	0,095	0,002
0,044	0,006	0,033	0,002
0,028	0,006	0,019	0,002

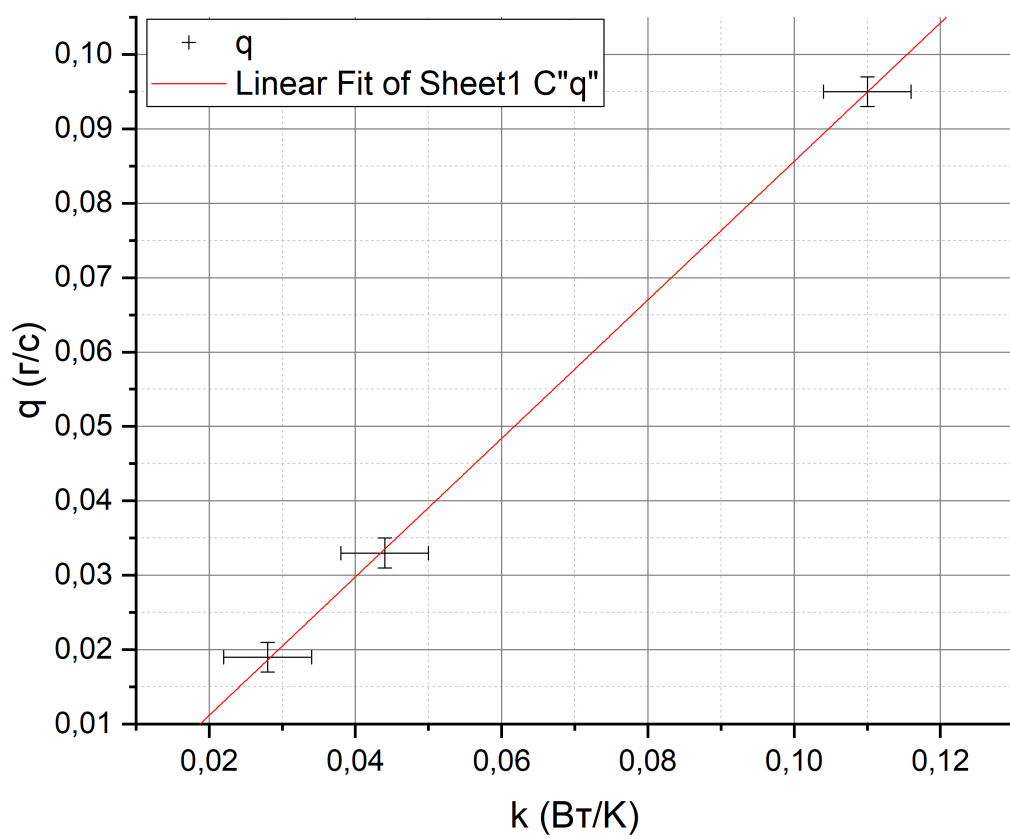


График для  $c_p$