

Отчет о выполнении работы №2.1.1.

Воейко Андрей Александрович, Б01-109

Долгопрудный, 2022

1 Аннотация

В работе измеряется повышение температуры воздуха в зависимости от мощности подводимого тепла и расхода при стационарном течении через трубу. После исключения тепловых потерь по результатам измерений определяется теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

2 Теоретические сведения

Уравнение теплоемкости тела для какого-то процесса имеет вид:

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

где C – теплоемкость тела, δQ – количество теплоты, полученное телом, dT – изменение температуры тела. В нашем же случае в качестве тела выступает воздух, а нагрев недостаточен для того, чтобы привести к значительному увеличению давления. Следовательно, в опыте измеряется теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Удельная же теплоемкость определяется по следующей формуле:

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

где c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, N и $N_{\text{пот}}$ – мощности нагрева и потерь соответственно, q – массовый расход воздуха, а ΔT – изменение температуры воздуха до и после нагрева.

Изменение температуры найдем по формуле:

$$\varepsilon = \beta \Delta T \Rightarrow \Delta T = \frac{\varepsilon}{\beta}, \quad (3)$$

где ε – Э. Д. С., образовавшаяся на концах термопары, а $\beta = 40,7 \frac{\text{мкВ}}{^\circ\text{C}}$ – чувствительность термопары при рабочем диапазоне температур (20 – 30 $^\circ\text{C}$).

Расход воздуха найдем по формуле:

$$q = \rho \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (4)$$

где Δt – время, за которое некоторый объем ΔV прошел через нагреватель, а ρ – плотность воздуха, которую можно получить путем сложения плотности сухого воздуха $\rho_0 = \frac{\mu P}{RT}$, где P – атмосферное давление, T – температура воздуха, $\mu = 29,0 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$ – средняя молярная масса сухого воздуха; и абсолютной влажности воды $\rho_v = \phi \rho_{\text{max}}$, где ϕ – относительная влажность, ρ_{max} – максимальная влажность воздуха при данной температуре воздуха: $\rho = \rho_0 + \rho_v$.

Предполагая, что в условиях, когда $\Delta T \ll T$, зависимость мощности

потерь $N_{\text{пот}}$ от изменения температуры ΔT можно считать линейной, получаем:

$$N_{\text{пот}} = \alpha \Delta T, \quad (5)$$

где α – некоторая константа.

Поскольку вся электрическая мощность нагревателя расходуется на нагрев проходящего воздуха и на потери, справедливо следующее уравнение:

$$N = c_p q \Delta T + N_{\text{пот}} = (c_p q + \alpha) \Delta T \quad (6)$$

Отсюда можно получить c_p :

$$c_p = \frac{N/\Delta T - \alpha}{q} \quad (7)$$

3 Оборудование

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

4 Результаты измерений и и обработка данных

4.1 Измерение температуры, давления и влажности

Измерим температуру воздуха и его влажность, используя термометры психрометра.

$$T = 24,2 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C} = 297,2 \text{ K} \pm 0,2 \text{ K}$$

$$\phi = 48\% \pm 2\%$$

Измерим давление при помощи цифрового барометра.

$$P_a = 734,6 \text{ мм рт. ст.} \pm 0,1 \text{ мм рт. ст.} = 9,77 \cdot 10^4 \text{ Па} \pm 0,01 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Найдем плотность воздуха в комнате.

- $\rho_0 = \frac{\mu P_a}{RT} = \frac{29 \cdot 9,77 \cdot 10^4}{8,31 \cdot 297,2} = 1,15 \cdot 10^3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} = 1,15 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
- $\Delta \rho_0 = \frac{\mu}{R} \cdot \frac{P_a \Delta T + T \Delta P_a}{T^2} = \frac{29}{8,31} \cdot \frac{9,77 \cdot 10^4 \cdot 0,2 + 297,2 \cdot 0,01 \cdot 10^4}{297,2^2} = 2 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$

- $\rho_{\text{в}} = \phi \rho_{\text{max}} = 0,48 \cdot 20,57 = 9,87 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} = 0,01 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
- $\Delta \rho_{\text{в}} = \rho_{\text{max}} \Delta \phi = 0,02 \cdot 20,57 = 0,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$
- $\rho = \rho_0 + \rho_{\text{в}} = 1,15 + 0,01 = 1,16 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
- $\Delta \rho = \Delta \rho_0 + \Delta \rho_{\text{в}} = 2,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$

Погрешность вычисления плотности воздуха оказалась незначительной по сравнению с интересующим нас порядком величины, поэтому в дальнейших расчетах учитываться не будет.

4.2 Первая серия измерений, с максимальным расходом воздуха

4.2.1 Измерение расхода воздуха

Измерения расхода произведем путем измерения времени, за которое через счетчик пройдет 5 л воздуха.

За погрешность измерения времени будем считать среднюю скорость реакции человека – 0,3 с.

Погрешностью измерения объема будем считать 0,1 л – цену деления счетчика.

Результаты занесем в таблицу 1.

В нее же занесем расход воздуха, вычисленный по формуле (1), и с погрешностью, вычисленной по следующей формуле: $\Delta q = \rho \frac{V \Delta t}{t^2}$.

№	Время t , с	Расход q , $\cdot 10^{-2} \frac{\text{г}}{\text{с}}$
1	$24,7 \pm 0,3$	$23,4 \pm 0,3$
2	$25,3 \pm 0,3$	$22,8 \pm 0,3$
3	$25,1 \pm 0,3$	$23,0 \pm 0,3$
4	$25,1 \pm 0,3$	$23,0 \pm 0,3$
5	$25,1 \pm 0,3$	$23,0 \pm 0,3$

Таблица 1: Результаты изменения расхода воздуха в установке в первой серии измерений.

Средний расход: $\overline{q_1} = 0,231 \frac{\text{г}}{\text{с}}$.

Ошибка среднего: $\sigma_{\overline{q_1}} = \pm 0,001 \frac{\text{г}}{\text{с}}$.

Таким образом, $q_1 = 0,231 \pm 0,001 \frac{\text{г}}{\text{с}}$

4.2.2 Изменение изменения температуры

Произведем измерение изменения температуры при различных мощностях нагревателя.

Результаты занесем в таблицу 2.

№	Ток через нагреватель, мА	Напряжение на нагревателе V , В	Мощность нагревателя N , мВт
1	$166,5 \pm 0,1$	$5,91 \pm 0,01$	984 ± 2
2	$143,3 \pm 0,1$	$5,07 \pm 0,01$	726 ± 2
3	$171,7 \pm 0,1$	$6,08 \pm 0,01$	1044 ± 2
4	$153,8 \pm 0,1$	$5,45 \pm 0,01$	838 ± 2
5	$129,1 \pm 0,1$	$4,57 \pm 0,01$	590 ± 2
№	Сопротивление нагревателя R , Ом	ЭДС термопары ϵ , мкВ	Разность температур ΔT , К
1	$35,5 \pm 0,1$	144 ± 1	$3,53 \pm 0,02$
2	$35,4 \pm 0,1$	107 ± 1	$2,63 \pm 0,02$
3	$35,4 \pm 0,1$	149 ± 1	$3,66 \pm 0,02$
4	$35,4 \pm 0,1$	123 ± 1	$3,02 \pm 0,02$
5	$35,4 \pm 0,1$	90 ± 1	$2,21 \pm 0,02$

Таблица 2: Результаты изменения мощности нагревателя и ЭДС термопары в первой серии измерений.

В качестве погрешностей измерения тока, ЭДС термопары и напряжения указаны не инструментальные погрешности, а погрешности сокращения величин, так как инструментальные погрешности значительно менее существенны. То же самое касается и погрешности измерения сопротивления.

4.3 Вторая серия измерений

Уменьшим расход воздуха и повторим измерения.

4.3.1 Расход воздуха

Занесем результаты в таблицу 3.

№	Время t , с	Расход q , $\cdot 10^{-2} \frac{\text{г}}{\text{с}}$
1	$36,5 \pm 0,3$	$15,82 \pm 0,02$
2	$36,3 \pm 0,3$	$15,89 \pm 0,02$
3	$36,5 \pm 0,3$	$15,83 \pm 0,02$
4	$36,5 \pm 0,3$	$15,81 \pm 0,02$

Таблица 3: Результаты изменения расхода воздуха в установке во второй серии измерений.

Средний расход: $\overline{q_2} = 0,158 \frac{\text{г}}{\text{с}}$.

Ошибка среднего: $\sigma_{\overline{q_2}} = \pm 0,0002 \frac{\text{г}}{\text{с}}$.

Ошибка среднего оказалась меньше интересующего нас порядка, в дал-

нейших вычислениях использоваться будет погрешность округления, равная $0,001 \frac{\text{г}}{\text{с}}$. Таким образом, $q_2 = 0,158 \pm 0,001 \frac{\text{г}}{\text{с}}$.

4.3.2 Измерение изменения температуры

Результаты занесем в таблицу 4.

№	Ток через нагреватель I , мА	Напряжение на нагревателе V , В	Мощность нагревателя N , мВт
1	$121,1 \pm 0,1$	$4,30 \pm 0,01$	521 ± 2
2	$161,3 \pm 0,1$	$5,73 \pm 0,01$	924 ± 2
3	$176,1 \pm 0,1$	$6,24 \pm 0,01$	1098 ± 2
4	$143,7 \pm 0,1$	$5,09 \pm 0,01$	732 ± 2
5	$134,6 \pm 0,1$	$4,76 \pm 0,01$	642 ± 2
№	Сопротивление нагревателя R , Ом	ЭДС термопары ϵ , мкВ	Разность температур ΔT , К
1	$35,5 \pm 0,1$	103 ± 1	$2,53 \pm 0,02$
2	$35,5 \pm 0,1$	185 ± 1	$4,54 \pm 0,02$
3	$35,4 \pm 0,1$	222 ± 1	$5,45 \pm 0,02$
4	$35,4 \pm 0,1$	156 ± 1	$3,83 \pm 0,02$
5	$35,4 \pm 0,1$	136 ± 1	$3,34 \pm 0,02$

Таблица 4: Результаты изменения мощности нагревателя и ЭДС термопары во второй серии измерений.

В качестве погрешностей измерения тока, ЭДС термопары и напряжения указаны не инструментальные погрешности, а погрешности сокращения величин, так как инструментальные погрешности значительно менее существенны. То же самое касается и погрешности измерения сопротивления.

4.4 Третья серия измерений

Увеличим расход воздуха и повторим измерения.

4.4.1 Расход воздуха

Занесем данные в таблицу 5.

Средний расход: $\overline{q_3} = 0,207 \frac{\text{г}}{\text{с}}$.

Ошибка среднего: $\sigma_{\overline{q_3}} = \pm 0,0003 \frac{\text{г}}{\text{с}}$.

Ошибка среднего оказалась меньше интересующего нас порядка, в дальнейших вычислениях использоваться будет погрешность округления, равная $0,001 \frac{\text{г}}{\text{с}}$. Таким образом, $q_3 = 0,207 \pm 0,001 \frac{\text{г}}{\text{с}}$.

№	Время t , с	Расход q , $\cdot 10^{-2} \frac{\text{г}}{\text{с}}$
1	$27,8 \pm 0,3$	$20,8 \pm 0,2$
2	$27,9 \pm 0,3$	$20,7 \pm 0,2$
3	$27,85 \pm 0,3$	$20,7 \pm 0,2$
4	$28,95 \pm 0,3$	$20,6 \pm 0,2$

Таблица 5: Результаты изменения расхода воздуха в установке в третьей серии измерений.

4.4.2 Изменение изменения температуры

Результаты занесем в таблицу 6.

№	Ток через нагреватель I , мА	Напряжение на нагревателе V , В	Мощность нагревателя N , мВт
1	$131,6 \pm 0,1$	$4,60 \pm 0,01$	605 ± 2
2	$153,9 \pm 0,1$	$5,40 \pm 0,01$	831 ± 2
3	$166,75 \pm 0,1$	$5,89 \pm 0,01$	981 ± 2
4	$177,5 \pm 0,1$	$6,27 \pm 0,01$	1112 ± 3
5	$140,0 \pm 0,1$	$4,94 \pm 0,01$	691 ± 2
№	Сопротивление нагревателя R , Ом	ЭДС термопары ϵ , мкВ	Разность температур ΔT , К
1	$35,0 \pm 0,1$	87 ± 1	$2,14 \pm 0,02$
2	$35,1 \pm 0,1$	120 ± 1	$2,95 \pm 0,02$
3	$35,3 \pm 0,1$	146 ± 1	$3,59 \pm 0,02$
4	$35,3 \pm 0,1$	171 ± 1	$4,20 \pm 0,02$
5	$35,3 \pm 0,1$	110 ± 1	$2,70 \pm 0,02$

Таблица 6: Результаты изменения мощности нагревателя и ЭДС термопары в третьей серии измерений.

В качестве погрешностей измерения тока, ЭДС термопары и напряжения указаны не инструментальные погрешности, а погрешности сокращения величин, так как инструментальные погрешности значительно менее существенны. То же самое касается и погрешности измерения сопротивления.

4.5 Обработка данных

4.5.1 Зависимости разности температур от мощности нагревателя

Построим графики зависимости нагрева воздуха от мощности нагревателя. Аппроксимируем зависимость прямой $y = kx$, и найдем коэффициент

k .

График для первой серии измерений изображен на рисунке 1, для второй серии – на рисунке 2, для третьей серии – на рисунке 3.

$$k_1 = 0,00359 \pm 0,00003 \frac{\text{К}}{\text{мВт}}.$$

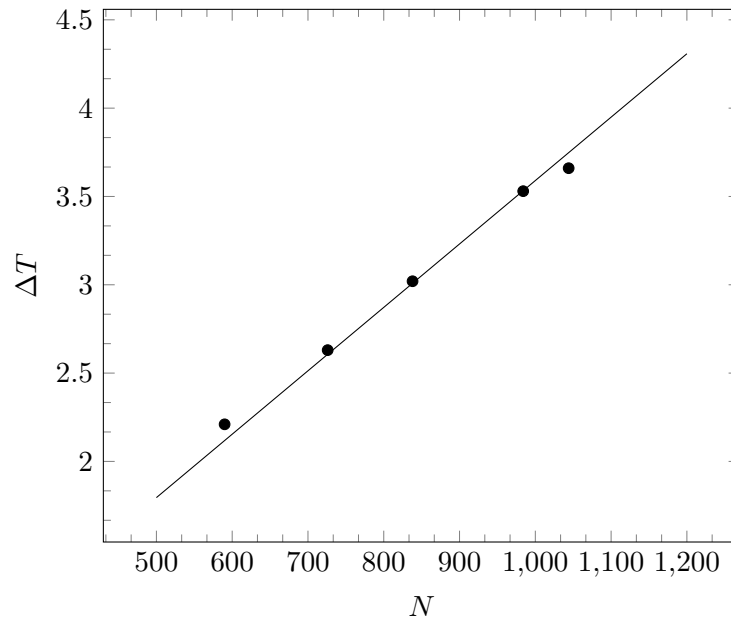


Рисунок 1: График зависимости нагрева воздуха от мощности нагревателя в первой серии измерений.

$$k_2 = 0,00502 \pm 0,00006 \frac{\text{К}}{\text{мВт}}.$$

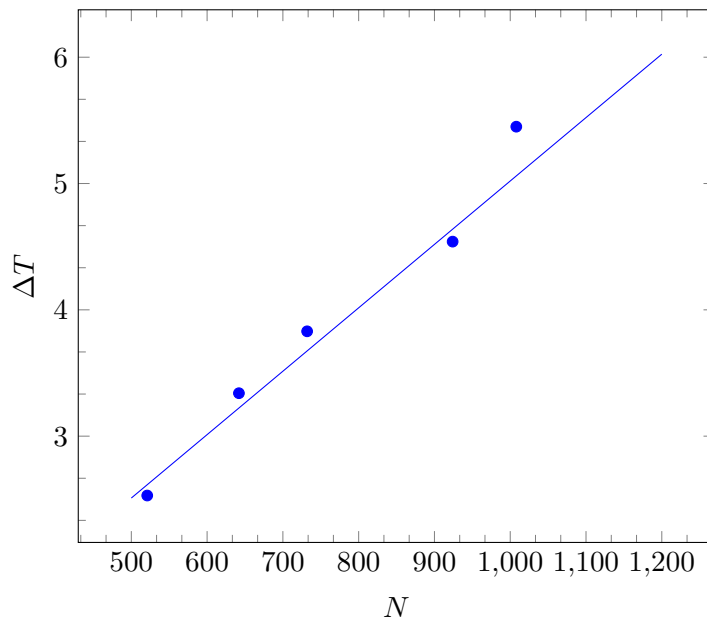


Рисунок 2: График зависимости нагрева воздуха от мощности нагревателя во второй серии измерений.

$$k_3 = 0,00370 \pm 0,00006 \frac{\text{K}}{\text{МВт}}.$$

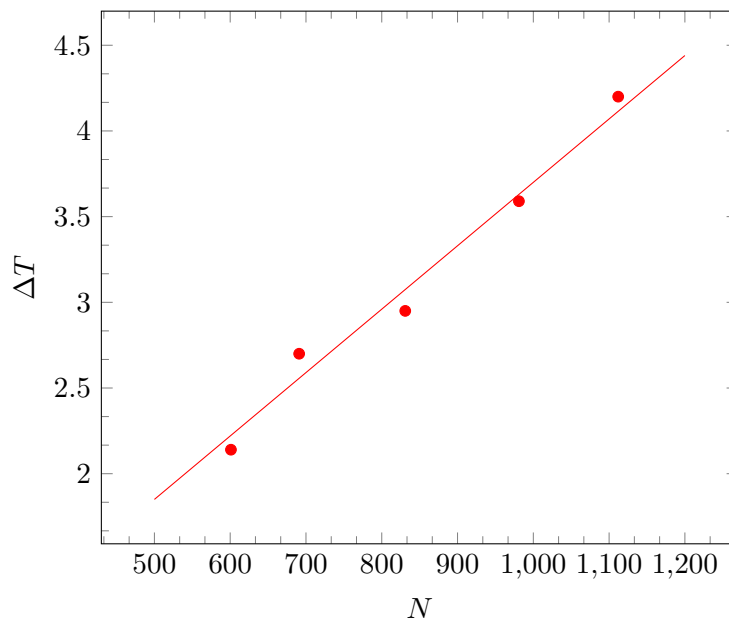


Рисунок 3: График зависимости нагрева воздуха от мощности нагревателя в третьей серии измерений.

4.5.2 Анализ зависимости угла наклона графиков от расхода воздуха

Занесем результаты измерения расхода воды q и вычисления соответствующего коэффициента k в таблицу 7.

№	Расход $q, \cdot 10^{-2} \frac{\text{г}}{\text{с}}$	Коэффициент $k, \cdot 10^{-3} \frac{\text{К}}{\text{мВт}}$	Величина $\frac{1}{k}, \frac{\text{мВт}}{\text{К}}$
1	$23,1 \pm 0,3$	$3,57 \pm 0,03$	279 ± 2
2	$15,8 \pm 0,1$	$5,02 \pm 0,06$	199 ± 2
3	$20,7 \pm 0,1$	$3,70 \pm 0,06$	271 ± 4

Таблица 7: Результаты измерения расхода воды q и вычисления соответствующего коэффициента k , а также величины $\frac{1}{k}$.

Поскольку теоретическая зависимость величины $1/k$ от расхода воздуха – линейная, построим график зависимости $\frac{1}{k}$ от q .

Построим на основе этих данных график 4.

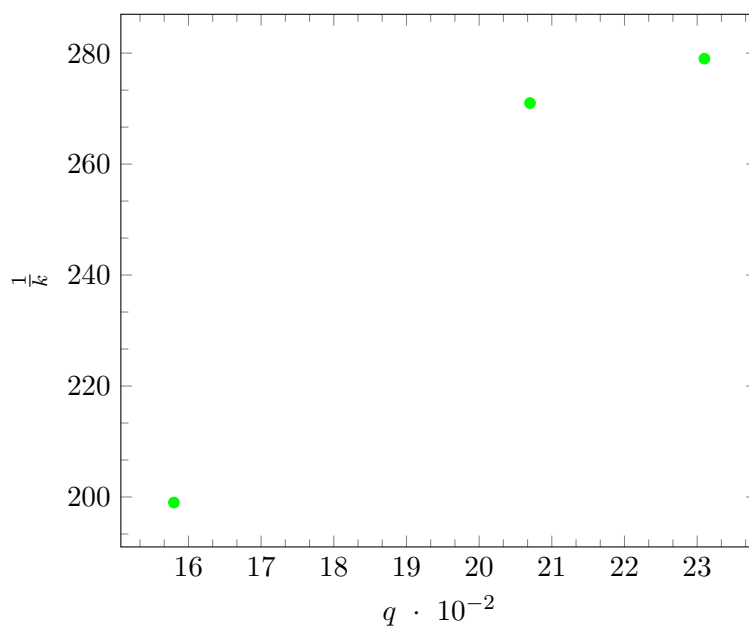


Рисунок 4: График зависимости коэффициента k от расхода воды.

4.5.3 Вычисление удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении и коэффициента тепловых потерь

Аппроксимация по трем значениям будет крайне неточной, но за неимением более точных способов найти коэффициенты c_p и α уравнения $\frac{1}{k} =$

$\alpha + c_p q$, воспользуемся им.

$$c_p = 1,15 \cdot 10^3 \pm 0,3 \cdot 10^3 \frac{\text{кДж}}{\text{г} \cdot \text{К}}.$$

$$\alpha = 21 \pm 7 \frac{\text{мВт}}{\text{К}}.$$

Таким образом, чтобы найти отношение $\frac{N_{\text{пот}}}{N}$, нужно разделить α на $\frac{1}{k}$. Занесем результаты измерений в таблицу 8.

№	Величина $\frac{1}{k}$, $\frac{\text{мВт}}{\text{К}}$	Коэффициент тепловых потерь $\frac{N_{\text{пот}}}{N}$, %
1	279 ± 2	$6,64 \pm 2,26$
2	199 ± 2	$10,6 \pm 3,64$
3	271 ± 4	$7,75 \pm 2,70$

Таблица 8: Результаты вычисления коэффициента тепловых потерь.

5 Вывод

В ходе работы были вычислено повышение температуры воздуха в зависимости от мощности проводимого тепла и расхода воздуха при стационарном течении через трубу. Также была подтверждена гипотеза о том, что мощность тепловых потерь зависит от мощности нагрева линейно, а также вычислена его составляющая в расходе тепловой мощности нагревателя. Была вычислена удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении. Табличное значение находится в пределах погрешности, но сама погрешность слишком высока – сказывается недостаточно большое количество данных.