

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 , Вт |
|---|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 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 Изменение изменения температуры

Результаты занесем в таблицу 4.

| № | Ток через нагреватель I , мА | Напряжение на нагревателе V , В | Мощность нагревателя N , Вт |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 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 , Вт |
|---|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 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.

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

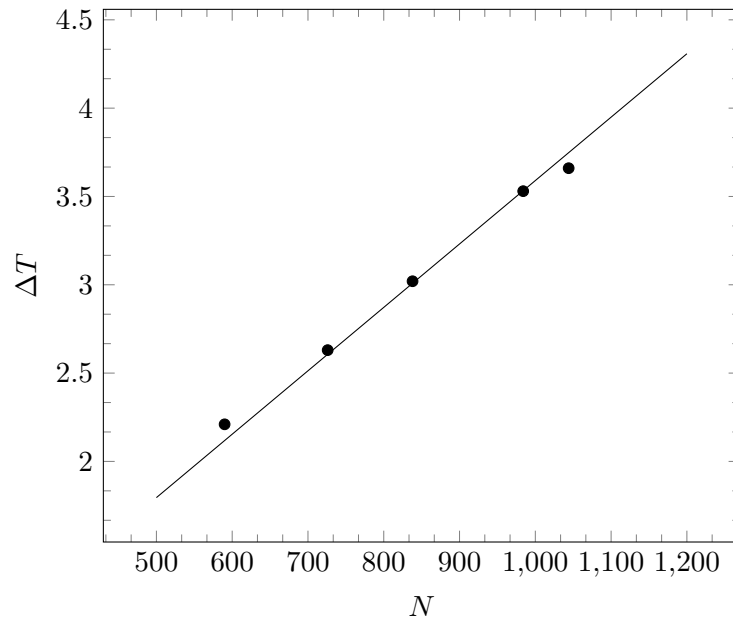


Рисунок 1: График зависимости нагрева воздуха от мощности нагревателя в первой серии измерений.

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

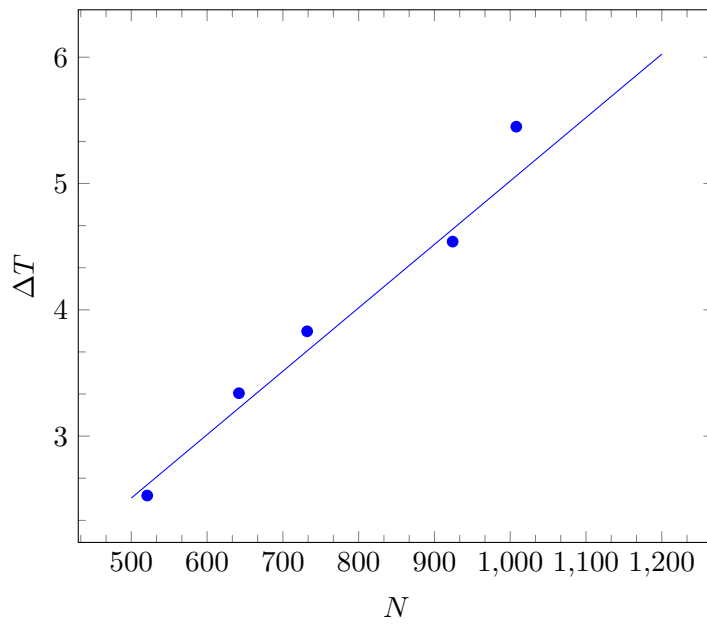


Рисунок 2: График зависимости нагрева воздуха от мощности нагревателя во второй серии измерений.

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

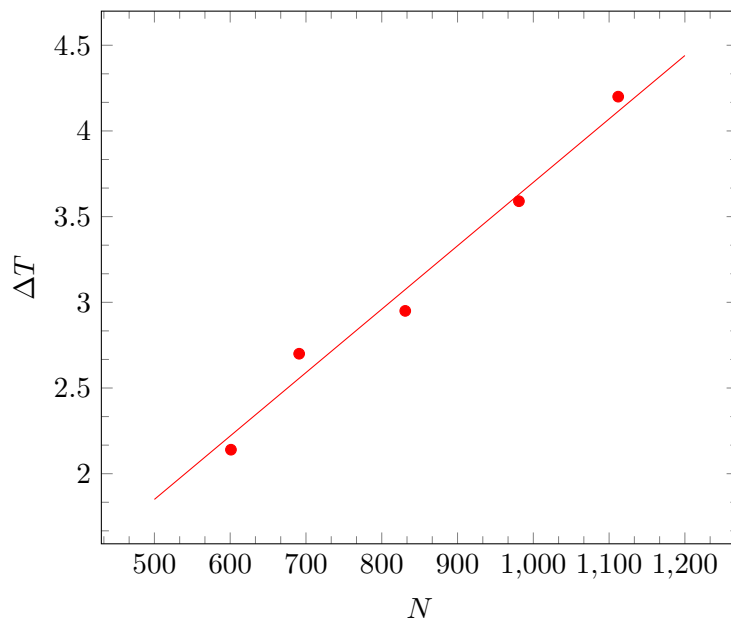


Рисунок 3: График зависимости нагрева воздуха от мощности нагревателя в третьей серии измерений.

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 $k, \cdot 10^{-3} \frac{\text{К}}{\text{Вт}}$ | Величина $\frac{1}{k}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$ |
|---|---|---|--|
| 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.

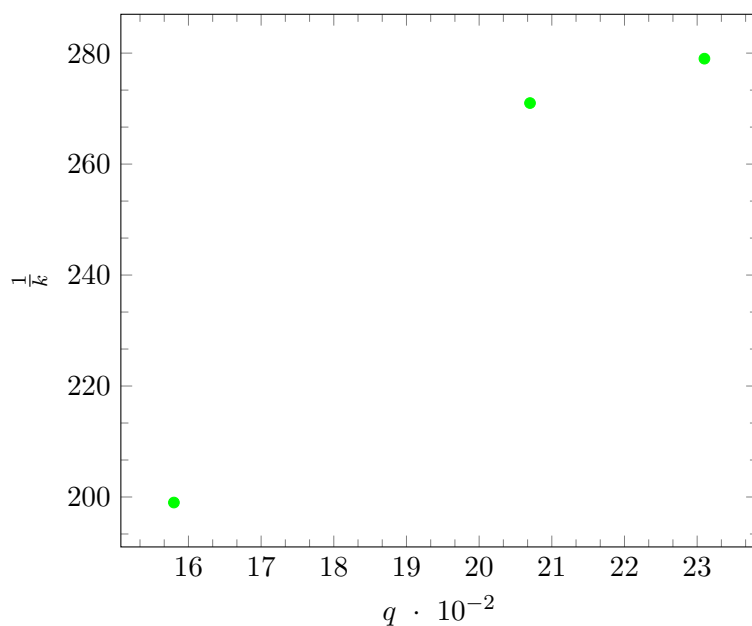


Рисунок 4: График зависимости коэффициента k от расхода воды.

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.

$$c_p = 1,15 \cdot 10^4 \pm 0,3 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{К}}.$$

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

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

| № | Величина $\frac{1}{k}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{К}}$ | 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.