

# Измерение вязкости воздуха по течению в тонких трубках. (1.3.3)

Зайнуллин Амир Б05-206

7 апреля 2023 г.

## 1 Аннотация

**Цель работы:** экспериментально исследовать свойства течения газов по тонким трубкам при различных числах Рейнольдса; выявить область применимости закона Пуазейля и с его помощью определить коэффициент вязкости воздуха.

**Оборудование:** система подачи воздуха (компрессор, поводящие трубки); газовый счетчик барабанного типа; спиртовой микроманометр с регулируемым наклоном; набор трубок различного диаметра с выходами для подсоединения микроманометра; секундомер.

## 2 Теоретические сведения

Сила вязкого трения согласно закону Ньютона, где  $\eta$  это коэффициент динамической вязкости (или просто вязкость среды):

$$\tau = \eta \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad (1)$$

Характер течения в жидкости может быть турбулентным или ламинарным. При ламинарном течении скорости образуют набор непрерывных линий тока, а слои жидкости не перемешиваются между собой. При малых  $Re$  течение ламинарно.

$$Re = \frac{\rho u a}{\eta} \quad (2)$$

$\rho$  - плотность среды,  $u$  - характерная скорость потока,  $a$  - характерный размер системы.

Формула Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \eta l} \quad \bar{u} = \frac{Q}{\pi R^2} - \text{средняя скорость потока} \quad (3)$$

Длина установления течения Пуазейля:

$$l_{\text{уст}} \approx 0.2 R \cdot Re \quad (4)$$

Отношение перепада давления в трубе к скоростному напору:

$$\tilde{\psi} = \frac{R \Delta P}{l \rho \bar{u}^2} \quad (5)$$

Из теории размерностей:

$$\frac{\Delta P}{l} = C(Re) \cdot \frac{\rho \bar{u}^2}{R} \quad (6)$$

При больших числах Рейнольдса параметры течения жидкости не зависят от коэффициента вязкости, поэтому  $C(Re) \mapsto \text{const}$ , откуда

$$Q = \text{const} \cdot R^{5/2} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho l}} \quad (7)$$

### 3 Экспериментальная установка

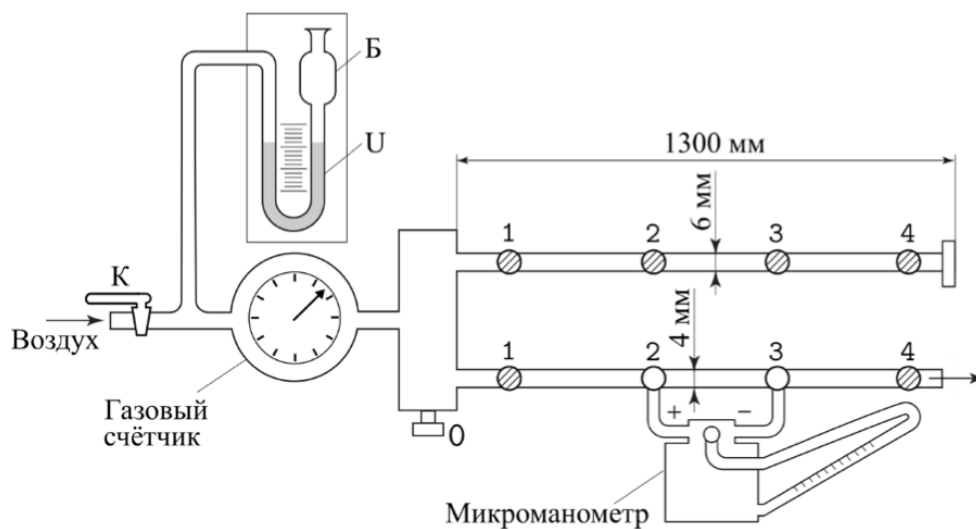


Рис. 1: Экспериментальная установка

Поток воздуха под давлением немного превышающим атмосферное, поступает через газовый счетчик в тонкие металлические трубки. Интенсивность его подачи регулируется краном К.

U-образный манометр для измерения давления на входе.

В работе используется газовый счётчик барабанного типа, позволяющий измерять объём газа  $\Delta V$  прошедшего через систему. Измеряя время  $\Delta t$  при помощи секундомера, можно вычислить средний объёмный расход газа  $Q = \Delta V / \Delta t$  (для получения массового расхода [кг/с] результат необходимо домножить на плотность газа  $\rho$ ).

Разность давлений на входах манометра измеряется по высоте подъема рабочей жидкости.

### Инструментальные погрешности

**Газовый счётчик:** класс точности 1

**Микроманометр:** класс точности 1

**Секундомер:**  $\Delta = \pm 0.3$  с

### 4 Результаты измерений и обработка данных

Измерили параметры окружающей среды: температуру, влажность воздуха и атмосферное давление.

| Р, кПа | T, К  | $\varphi$ , % |
|--------|-------|---------------|
| 98.5   | 294,5 | 18.5          |

Таблица 1: Параметры окружающей среды

Проведем предварительные расчеты по следующим формулам.  $\eta = 2 \cdot 10^{-5}$  Па·с,  $Re = 1000$

$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

$$Q_{кр} = \frac{Re\eta\pi r RT}{pM}$$

$$\Delta P_{кр} = \frac{8Q_{кр}\eta l}{\pi r^4}$$

|                                      |      |      |      |
|--------------------------------------|------|------|------|
| $l$ , см                             | 50   | 90   | 40   |
| $d$ , мм                             | 3,95 | 4,95 | 3    |
| Из теории                            |      |      |      |
| $Q_{кр} \cdot 10^{-4} \frac{м^3}{с}$ | 1,06 | 1,36 | 0,82 |
| $p_{кр}$ , Па                        | 178  | 153  | 328  |
| $p_{кр}$ , дел.                      | 91   | 71   | 169  |
| $l$ , см                             | 39,5 | 50,5 | 34,2 |
| из эксп.                             |      |      |      |
| $p_{кр}$ , дел.                      | 75   | 65   | 168  |

Таблица 2: Полученные данные

Подобрали параметры измерения так, чтобы относительная погрешность была меньше процента. Для малых давлений относительная погрешность больше процента, потому что объем измерялся долго. Абсолютная погрешность измерения объема равна  $5 \text{ л} \cdot 0,01 = 0,05 \text{ л}$ , так как класс точности газового счетчика равен 1, а предел измерения равен 5 л.

| $t$ , с | $\varepsilon_T$ | $V$ , л | $\varepsilon_V$ | $\Delta P$ , мм | $P$ , Па | $Q$ , $м^3/с \cdot 10^{-4}$ | $\sigma_Q$ , $м^3/с \cdot 10^{-4}$ |
|---------|-----------------|---------|-----------------|-----------------|----------|-----------------------------|------------------------------------|
| 166     | 0,0002          | 4       | 0,013           | 20              | 39       | 0,24                        | 0,003                              |
| 113,3   | 0,0003          | 4       | 0,013           | 29              | 57       | 0,35                        | 0,005                              |
| 140,4   | 0,0002          | 6       | 0,008           | 35              | 68       | 0,43                        | 0,004                              |
| 137     | 0,0002          | 7       | 0,007           | 42              | 82       | 0,51                        | 0,004                              |
| 115,6   | 0,0003          | 7       | 0,007           | 50              | 98       | 0,61                        | 0,004                              |
| 113,3   | 0,0003          | 8       | 0,006           | 58              | 113      | 0,71                        | 0,005                              |
| 99,1    | 0,0003          | 8       | 0,006           | 66              | 129      | 0,81                        | 0,005                              |
| 89,9    | 0,0003          | 8       | 0,006           | 72              | 141      | 0,89                        | 0,006                              |
| 82,1    | 0,0004          | 8       | 0,006           | 92              | 180      | 0,97                        | 0,006                              |
| 76,1    | 0,0004          | 8       | 0,006           | 120             | 235      | 1,05                        | 0,007                              |
| 69,9    | 0,0004          | 8       | 0,006           | 148             | 290      | 1,14                        | 0,008                              |
| 74,8    | 0,0004          | 9       | 0,006           | 166             | 325      | 1,20                        | 0,007                              |
| 71,2    | 0,0004          | 9       | 0,006           | 185             | 362      | 1,26                        | 0,008                              |
| 63      | 0,0005          | 9       | 0,006           | 235             | 460      | 1,43                        | 0,009                              |
| 58      | 0,0005          | 9       | 0,006           | 275             | 538      | 1,55                        | 0,009                              |

Таблица 3: Таблица измерений для 3,95 мм

| $t, \text{с}$ | $\varepsilon_T$ | $V, \text{л}$ | $\varepsilon_V$ | $\Delta P, \text{мм}$ | $P, \text{Па}$ | $Q, \text{м}^3/\text{с} \cdot 10^{-4}$ | $\sigma_Q, \text{м}^3/\text{с} \cdot 10^{-4}$ |
|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|----------------|--|---|
| 111,1         | 0,0003          | 6             | 0,008           | 26                    | 51             | 0,54                                   | 0,005   |
| 93,5          | 0,0003          | 6             | 0,008           | 31                    | 61             | 0,64                                   | 0,006   |
| 76,3          | 0,0004          | 6             | 0,008           | 39                    | 76             | 0,79                                   | 0,007   |
| 76,2          | 0,0004          | 7             | 0,007           | 47                    | 92             | 0,92                                   | 0,007   |
| 77,4          | 0,0004          | 8             | 0,006           | 54                    | 106            | 1,03                                   | 0,007   |
| 72            | 0,0004          | 8             | 0,006           | 60                    | 117            | 1,11                                   | 0,007   |
| 69,4          | 0,0004          | 8             | 0,006           | 66                    | 129            | 1,15                                   | 0,008   |
| 59,3          | 0,0005          | 8             | 0,006           | 90                    | 176            | 1,35                                   | 0,009   |
| 51,6          | 0,0006          | 8             | 0,006           | 127                   | 248            | 1,55                                   | 0,011   |
| 53,8          | 0,0006          | 9             | 0,006           | 153                   | 299            | 1,67                                   | 0,010   |
| 49,8          | 0,0006          | 9             | 0,006           | 175                   | 342            | 1,81                                   | 0,011   |
| 46,1          | 0,0007          | 9             | 0,006           | 205                   | 401            | 1,95                                   | 0,012   |
| 42,5          | 0,0007          | 9             | 0,006           | 238                   | 466            | 2,12                                   | 0,013   |
| 40,4          | 0,0007          | 9             | 0,006           | 262                   | 513            | 2,23                                   | 0,014   |

Таблица 4: Таблица измерений для 5,05 мм

| $t, \text{с}$ | $\varepsilon_T$ | $V, \text{л}$ | $\varepsilon_V$ | $\Delta P, \text{мм}$ | $P, \text{Па}$ | $Q, \text{м}^3/\text{с} \cdot 10^{-4}$ | $\sigma_Q, \text{м}^3/\text{с} \cdot 10^{-4}$ |
|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|----------------|--|---|
| 68,6          | 0,0004          | 3             | 0,017           | 40                    | 78             | 0,44                                   | 0,007   |
| 71            | 0,0004          | 4             | 0,013           | 55                    | 108            | 0,56                                   | 0,007   |
| 59,4          | 0,0005          | 4             | 0,013           | 74                    | 145            | 0,67                                   | 0,009   |
| 66            | 0,0005          | 5             | 0,010           | 90                    | 176            | 0,76                                   | 0,008   |
| 63,7          | 0,0005          | 6             | 0,008           | 125                   | 245            | 0,94                                   | 0,008   |
| 53,1          | 0,0006          | 6             | 0,008           | 170                   | 333            | 1,13                                   | 0,010   |
| 59,6          | 0,0005          | 7             | 0,007           | 195                   | 382            | 1,17                                   | 0,009   |
| 52,3          | 0,0006          | 7             | 0,007           | 229                   | 448            | 1,34                                   | 0,010   |
| 57,9          | 0,0005          | 8             | 0,006           | 252                   | 493            | 1,38                                   | 0,009   |
| 55,9          | 0,0005          | 8             | 0,006           | 275                   | 538            | 1,43                                   | 0,010   |

Таблица 5: Таблица измерений для 3 мм

Линии проведены при помощи МНК, по точкам с ламинарным течением.

С помощью коэффициентов наклона мы можем найти вязкость воздуха из формулы (3):

$$\eta = \frac{\pi R^4}{8kl}$$

где  $k$  – коэффициент наклона графика,  $l$  – длина участка трубы, а  $R$  – радиус трубки.

По графикам определим значения коэффициента наклона с погрешностями:

|   | $d_1 = 3.0 \text{ мм}$ | $d_2 = 3.95 \text{ мм}$ | $d_3 = 5.05 \text{ мм}$ |
|---|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $k \cdot 10^{-6}, \text{м}^3/\text{с} \cdot \text{Па}$        | 0,3                    | 0,63                    | 0,87                    |
| $\sigma_k \cdot 10^{-6}, \text{м}^3/\text{с} \cdot \text{Па}$ | 0.02                   | 0.004                   | 0,02                    |
| $\eta \cdot 10^{-5}, \text{Па} \cdot \text{с}$                | 1.66                   | 1.90                    | 2,04                    |
| $\sigma_\eta \cdot 10^{-5}, \text{Па} \cdot \text{с}$         | 0.11                   | 0.01                    | 0.05                    |

Таблица 6: Результаты полученные из графиков

Возьмем два последних значения и усредним

$$\eta = (1.97 \pm 0.03) \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

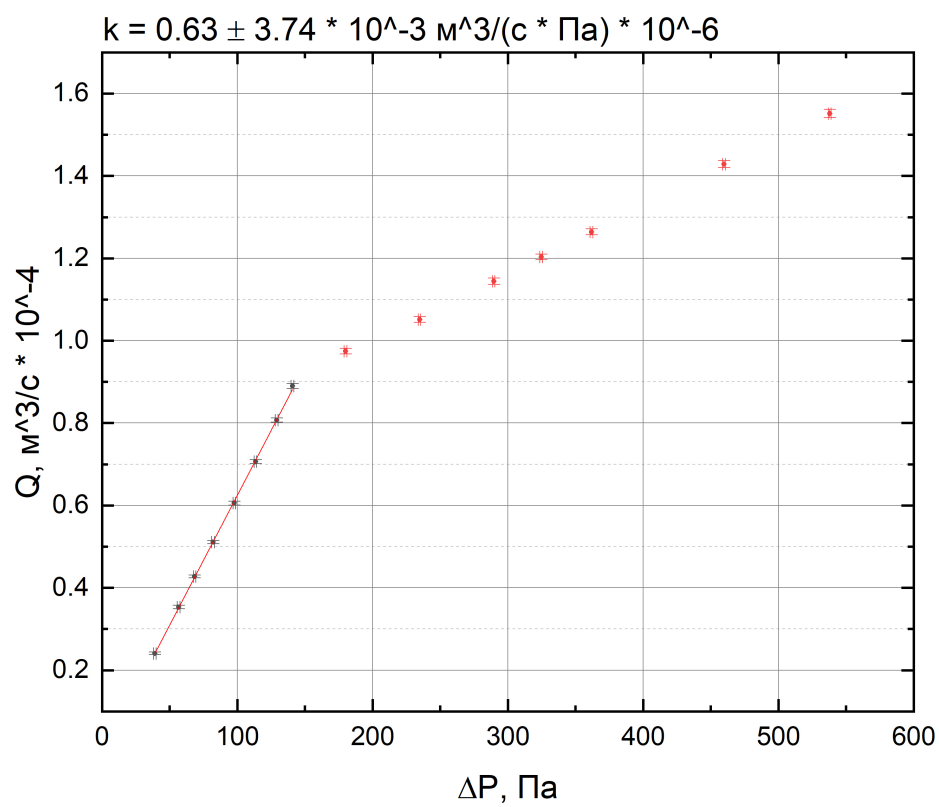


Рис. 2: График для  $d = 3,95 \text{ мм}$

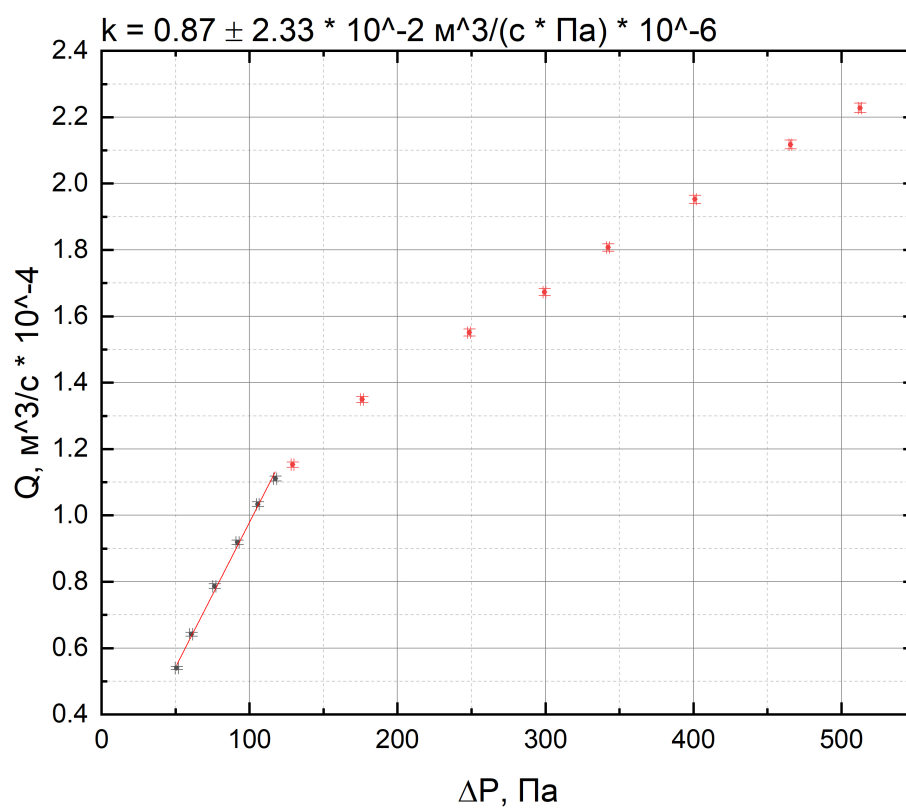


Рис. 3: График для  $d = 5,05 \text{ мм}$

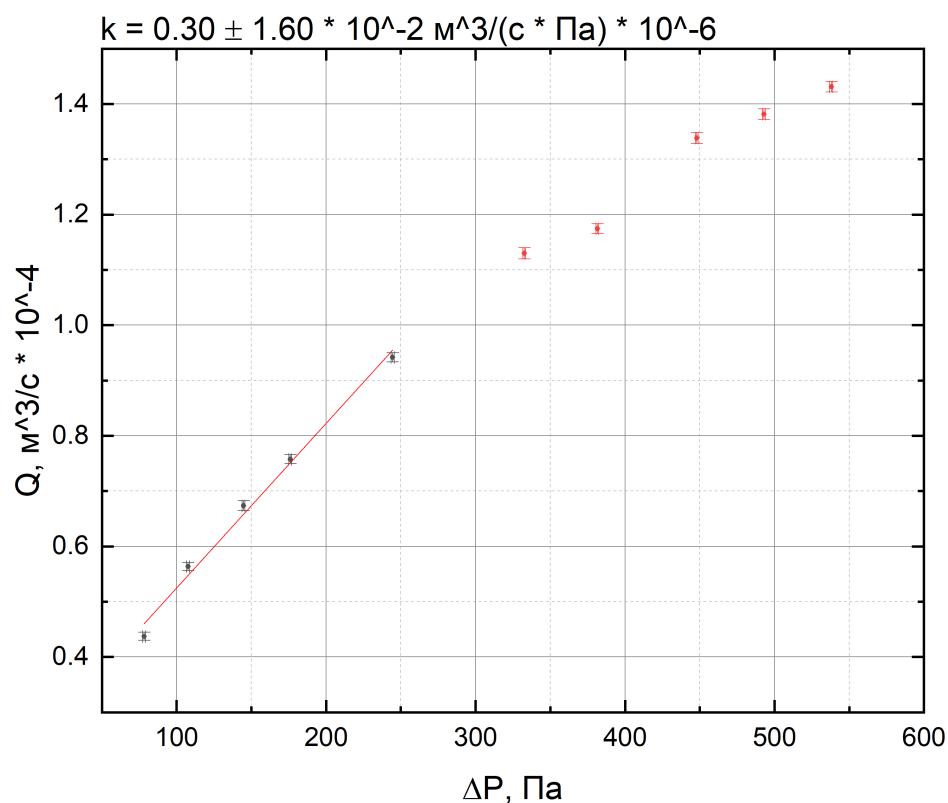


Рис. 4: График для  $d = 3 \text{ мм}$

Далее найдем критическое число Рейнольдса  $Re_{\text{кр}}$  для всех трубок:

$$Re = \frac{\rho u R}{\eta} = \frac{\rho Q}{\pi R \eta}$$

- $d_1 = 3.00 \text{ мм}$ : критический расход:  $Q_1 = 0,94 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ , тогда  $Re_1 = 1143 \pm 20$ .
- $d_2 = 3.95 \text{ мм}$ : критический расход:  $Q_2 = 0,89 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ , тогда  $Re_2 = 870 \pm 15$ .
- $d_3 = 5.05 \text{ мм}$ : критический расход:  $Q_3 = 1,11 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ , тогда  $Re_3 = 854 \pm 14$ .

## Распределение давления газа вдоль трубки

Установили поток воздуха через трубку, близкий к критическому, но все еще сохраняющий ламинарный. Не меняя формат, подсоединим микроманометр ко всем выводам и измерим перепады давления.

| $d, \text{мм}$ | $Q \text{ м}^3/\text{с} \cdot 10^{-4}$ | $L, \text{см}$ | $p, \text{дел.}$ | $p, \text{Па}$ |
|----------------|--|----------------|------------------|----------------|
| 3,95           | 0,084                                  | 50             | 68               | 133,3          |
| 3,95           | 0,084                                  | 90             | 125              | 245,0          |
| 3,95           | 0,084                                  | 120            | 220              | 431,2          |
| 5,05           | 0,11                                   | 90             | 59               | 115,6          |
| 5,05           | 0,11                                   | 120            | 77               | 150,9          |

Таблица 7: Полученные данные

Построим полученные графики

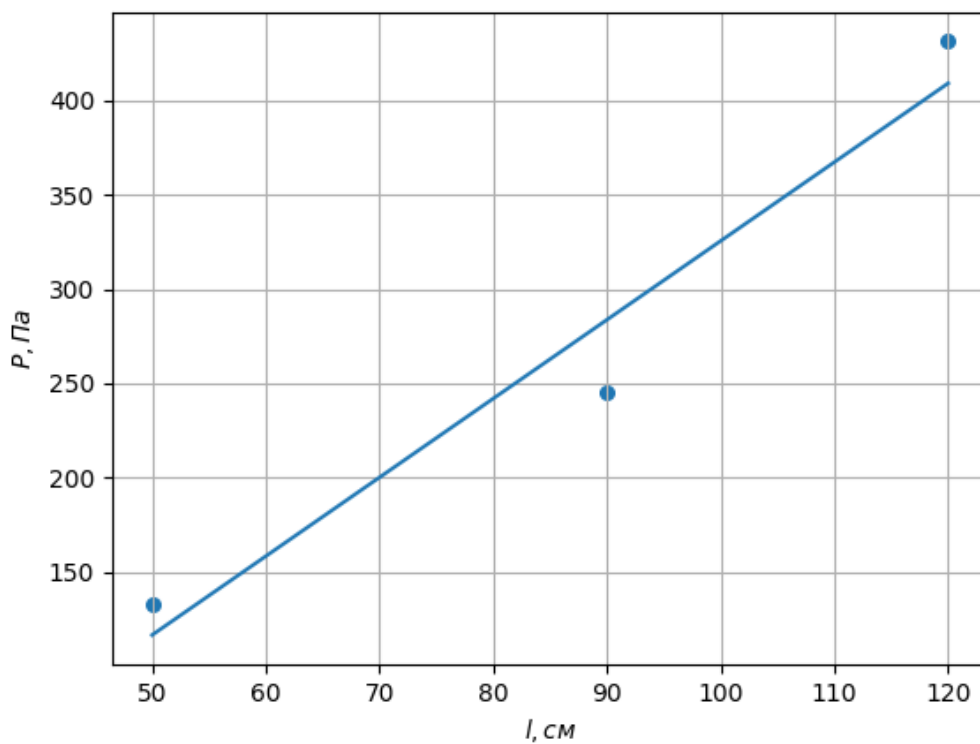


Рис. 5: График для  $d = 3,95$  мм

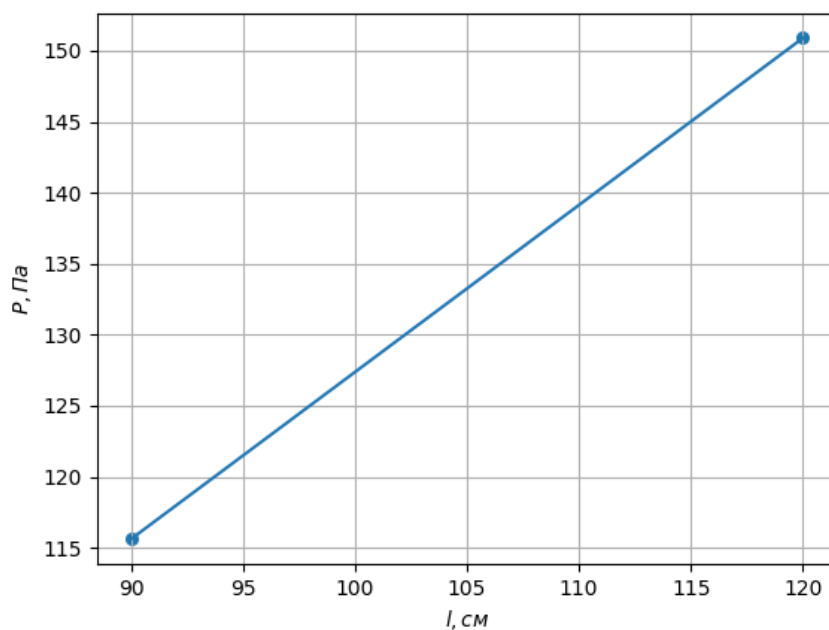


Рис. 6: График для  $d = 5,05$  мм

## Измерение зависимости расхода от радиуса трубы при заданном градиенте

Подобрали некоторое значение градиента давления, при котором на всех трубках происходит ламинарное течение воздуха. Для каждой трубки подобрали расход, когда градиент равен данному.  $\Delta P/l = 0,72$  дел/см

| $l$ , см | $P$ , дел. | $d$ , мм | $\ln(r)$ | $V$ , л | $t$ , с | $Q$ м <sup>3</sup> /с · 10 <sup>-4</sup> | $\ln(Q)$ |
|----------|------------|----------|----------|---------|---------|--|----------|
| 90       | 65         | 5,05     | 0,93     | 6       | 52,69   | 0,11                                     | -2,17    |
| 40       | 29         | 3        | 0,41     | 2       | 63,3    | 0,03                                     | -3,45    |
| 50       | 36         | 3,95     | 0,68     | 4       | 75,9    | 0,05                                     | -2,94    |

Таблица 8: Полученные данные

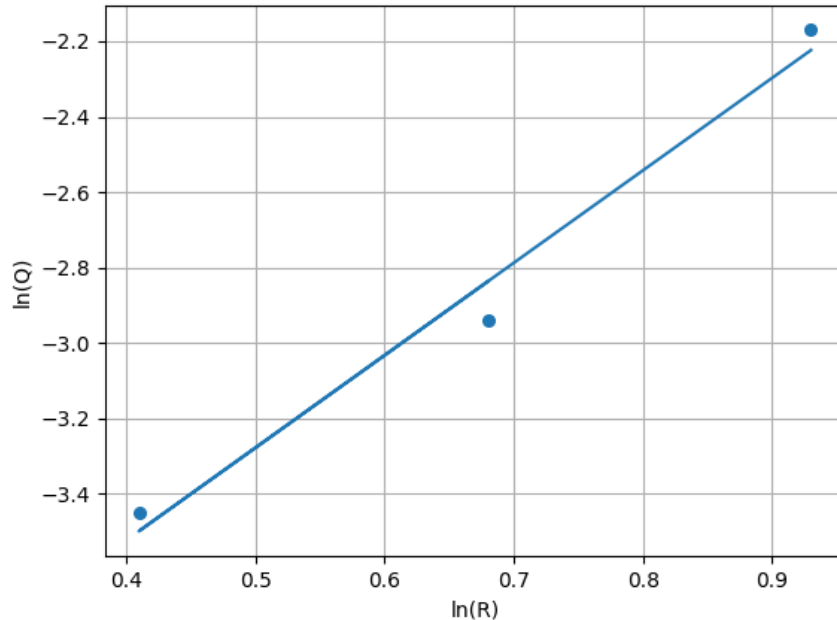


Рис. 7: График для определение степени  $\beta$

По МНК получим, что для ламинарного течения  $\beta = 2,45 \pm 0,37$ .

## 5 Вывод

В данной лабораторной работе мы исследовали свойства течения газов по тонким трубам при различных числах Рейнольдса. Так же выявили область применимости закона Пуазейля и с его помощью определили коэффициент вязкости воздуха.

$$\eta = (1.97 \pm 0.09) \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Сравним с табличным значением которое равно

$$\eta = 1.78 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Видно, что значения получились довольно близки друг к другу. Малое расхождение обусловлено тем, что в этой лабораторной работе нет приборов, которое бы вносило большую погрешность, а объем и время мы мерили так, чтобы относительная погрешность расхода была меньше процента.

Также в работе была изучена зависимость расхода от радиуса трубы при заданном градиенте. Для ламинарного течения мы получили показатель степени 2.45, что должно быть показателем степени для турбулентного течения. Возможно, мы неправильно посчитали градиент, и в каждой трубке было турбулентное течение.