

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

Ладченко Мария

## Введение

**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.

## Теоретические сведения

Рассмотрим движение вязкой жидкости или газа по трубке круглого сечения. При малых скоростях потока движение оказывается ламинарным (слоистым), скорости частиц меняются по радиусу и направлены вдоль оси трубки. С увеличением скорости потока движение становится турбулентным, а слои перемешиваются. При турбулентном движении скорость в каждой точке быстро меняет величину и направление, сохраняется только средняя величина скорости.

Характер движения газа (или жидкости) в трубке определяется безразмерным числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{vr\rho}{\eta}$$

где  $v$  – скорость потока,  $r$  – радиус трубки,  $\rho$  – плотность движущейся среды,  $\eta$  – её вязкость. В гладких трубах круглого сечения переход от ламинарного движения к турбулентному происходит при  $Re \approx 1000$ .

При ламинарном течении объем газа  $V$ , протекающий за время  $t$  по трубке длиной  $l$ , определяется формулой Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\Delta l \eta} (P_1 - P_2)$$

В этой формуле  $P_1 - P_2$  – разность давлений в двух выбранных сечениях 1 и 2, расстояние между которыми равно  $\Delta l$ . Величину  $Q$  обычно называют расходом. Формула (1) позволяет определять вязкость газа по его расходу.

Отметим условия, при которых справедлива формула (1). Прежде всего необходимо, чтобы с достаточным запасом выполнялось неравенство  $Re < 1000$ . Необходимо также, чтобы при течении не происходило существенного изменения удельного объема газа (при выводе формулы удельный объем считался постоянным). Для жидкости это предположение выполняется практически всегда, а для газа — лишь в тех случаях, когда перепад давлений вдоль трубки мал по сравнению с самим давлением. В нашем случае давление газа равно атмосферному ( $10^3$  см вод. ст.), а перепад давлений составляет не более 10 см вод. ст., т. е. менее 1% от атмосферного. Формула (1) выводится для участков трубки, на которых закон распределения скоростей газа по сечению не меняется при движении вдоль потока.



Рис. 1: Формирование потока газа в трубке круглого сечения

При втекании газа в трубку из большого резервуара скорости слоёв вначале постоянны по всему направлению. По мере продвижения газа по трубке картина распределения скоростей меняется, так как сила трения о стенку тормозит прилежащие к ней оси. Характерное для ламинарного течения параболическое распределение скоростей устанавливается на некотором расстоянии  $a$  от входа в трубку, которое зависит от радиуса трубки  $r$  и числа Рейнольдса по формуле

$$a \approx 0.2rRe$$

Градиент давления на участке формирования потока оказывается больше, чем на участке с установившимся ламинарным течением, что позволяет разделить эти участки экспериментально. Формула (2) даёт возможность оценить длину участка формирования.

## Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки изображена на Рис. 2. Поток воздуха под давлением, немного превышающим атмосферное, поступает через газовый счётчик в тонкие металлические трубки. Воздух нагнетается компрессором, интенсивность его подачи регулируется краном К. Трубки снабжены съёмными заглушками на концах и рядом миллиметровых отверстий, к которым можно подключать микроманометр. В рабочем состоянии открыта заглушка на одной (рабочей) трубке, микроманометр подключён к двум её выводам, а все остальные отверстия плотно закрыты пробками.

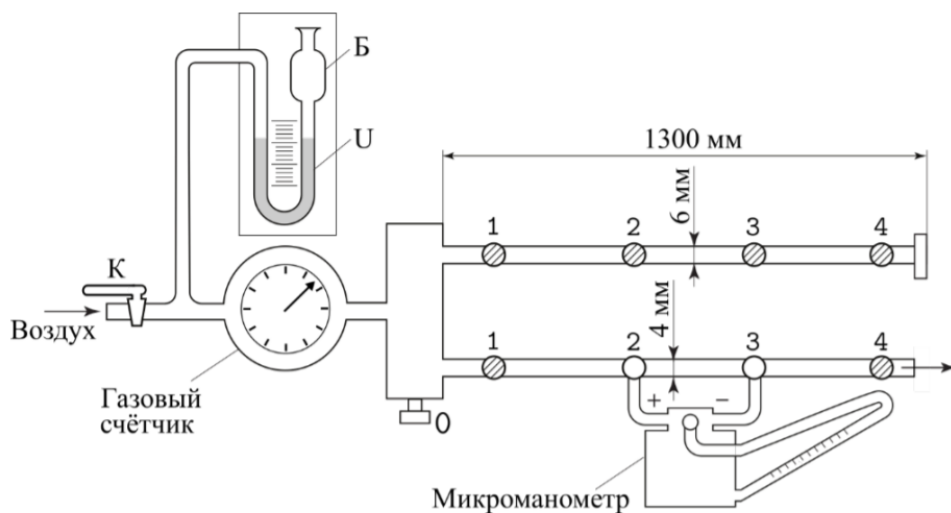


Рис. 2: Экспериментальная установка

Перед входом в газовый счётчик установлен водяной U-образный манометр. Он служит для измерения давления газа на входе, а также предохраняет счётчик от выхода из строя. При превышении максимального избыточного давления на входе счётчика ( $\sim 30$  см вод. ст.) вода выплёскивается из трубки в защитный баллон Б, создавая шум и привлекая к себе внимание экспериментатора.

**Газовый счётчик.** 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  $[\text{кг/с}]$  результат необходимо домножить на плотность газа  $\rho$ ).

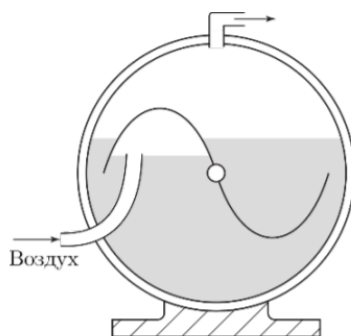


Рис. 3: Газовый счетчик

Работа счётчика основана на принципе вытеснения: на цилиндрической ёмкости жёстко укреплены лёгкие чаши (см. Рис. 3, где для упрощения изображены только две чаши), в которые поочередно поступает воздух из входной трубки расходомера. Когда чаша наполняется, она всплывает и её место занимает следующая и т.д. Вращение оси предаётся на счётно-суммирующее устройство. Для корректной работы счётчика он должен быть заполнен водой и установлен горизонтально по уровню (подробнее см. техническое описание установки).

**Микроманометр.** В работе используется жидкостный манометр с наклонной трубкой. Разность давлений на входах манометра измеряется по высоте подъёма этилового спирта. Регулировка наклона позволяет измерять давление в различных диапазонах.

На крышке прибора установлен трехходовой кран, имеющий два рабочих положения — (0) и (+). В положении (0) производится установка мениска жидкости на ноль, что необходимо сделать перед началом работы (в процессе работы также рекомендуется периодически проверять положение нуля). В положении (+) производятся измерения.

## Ход работы

Эксперимент проводился при комнатной температуре  $T_{\text{комн}} = 298,6\text{K}$ , при атмосферном давлении  $P_{\text{атм}} = 101,75\text{ кПа}$  и при относительной влажности в помещении  $\eta = 74\%$ .

Давление, измеряемое микроманометром, определяется по формуле:

$$P = 9,81 \cdot K \cdot l$$

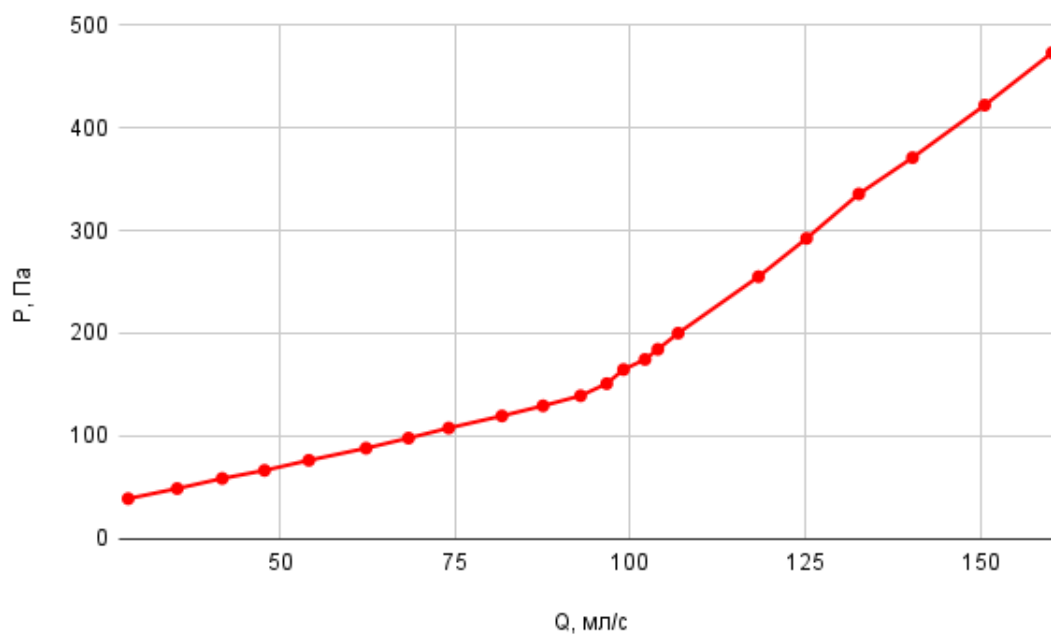
где  $l$  – показание макроманометра,  $K$  – коэффициент наклона,  $P$  – Давление в паскалях.

## Зависимость разности давлений от расхода

Эксперимент проводился на первой трубе с диаметром  $d_1 = 4,10 \pm 0,05\text{ мм}$ .

| $\Delta P$ , дел | $V$ , л | $\Delta P$ , Па | $Q$ , л/с | $\Delta t$ , с |
|------------------|---------|-----------------|-----------|----------------|
| 241              | 4.807   | 472.84          | 160.23    | 30             |
| 215              | 4.518   | 421.83          | 150.60    | 30             |
| 189              | 4.209   | 370.81          | 140.30    | 30             |
| 171              | 3.979   | 335.50          | 132.63    | 30             |
| 149              | 3.755   | 292.33          | 125.16    | 30             |
| 130              | 3.549   | 255.06          | 118.30    | 30             |
| 102              | 3.205   | 200.12          | 106.83    | 30             |
| 94               | 3.118   | 184.42          | 103.93    | 30             |
| 89               | 3.063   | 174.61          | 102.10    | 30             |
| 84               | 2.971   | 164.80          | 99.03     | 30             |
| 77               | 2.899   | 151.07          | 96.63     | 30             |
| 71               | 2.787   | 139.30          | 92.90     | 30             |
| 66               | 2.626   | 129.49          | 87.53     | 30             |
| 61               | 2.450   | 119.68          | 81.66     | 30             |
| 55               | 2.222   | 107.91          | 74.06     | 30             |
| 50               | 2.050   | 98.10           | 68.33     | 30             |
| 45               | 1.868   | 88.29           | 62.26     | 30             |
| 39               | 1.623   | 76.51           | 54.1      | 30             |
| 34               | 1.433   | 66.70           | 47.76     | 30             |
| 30               | 1.252   | 58.86           | 41.73     | 30             |
| 25               | 1.059   | 49.05           | 35.29     | 30             |
| 20               | 0.841   | 39.24           | 28.03     | 30             |

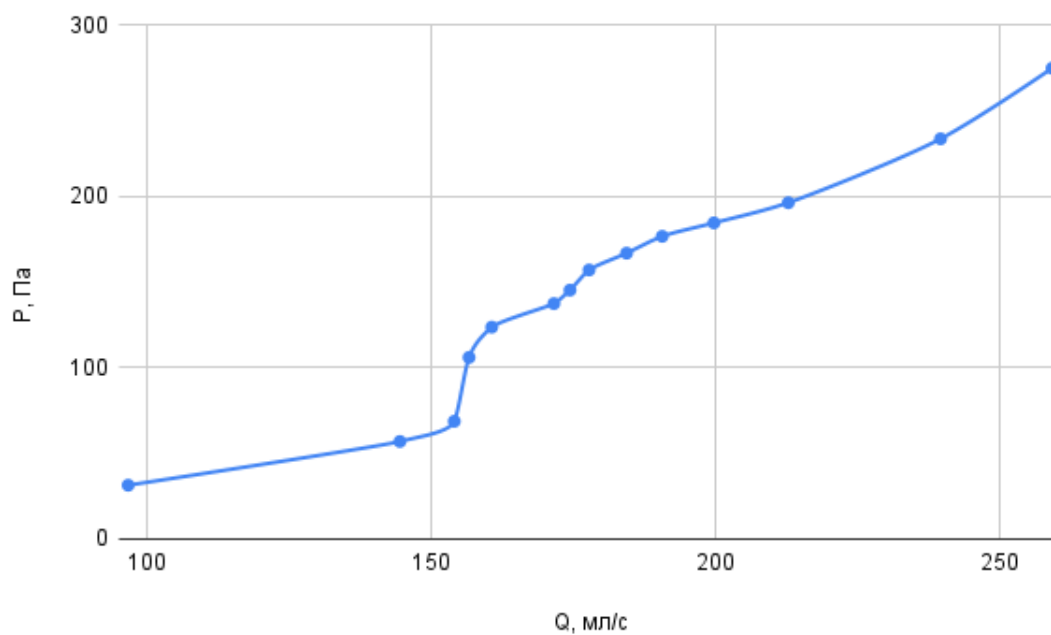
По угловому коэффициенту и формуле (1) можно оценить вязкость воздуха, воспользовавшись МНК аппроксимацией. Она составила  $\eta = (2,13 \pm 0,12) \cdot 10^{-5}\text{ Па}\cdot\text{с}$



Эксперимент проводился на второй трубе с диаметром  $d_1 = 4,10 \pm 0,05$  мм., где  $\Delta t = 30$ с

| $\Delta P$ , Па | $Q$ , мл/с |
|-----------------|------------|
| 274.68          | 259.16     |
| 233.47          | 239.53     |
| 196.20          | 212.73     |
| 184.42          | 199.63     |
| 176.58          | 190.53     |
| 166.77          | 184.26     |
| 156.96          | 177.66     |
| 145.18          | 174.30     |
| 137.34          | 171.46     |
| 123.60          | 160.53     |
| 105.94          | 156.53     |
| 68.67           | 153.93     |
| 56.89           | 144.36     |
| 31.39           | 96.53      |

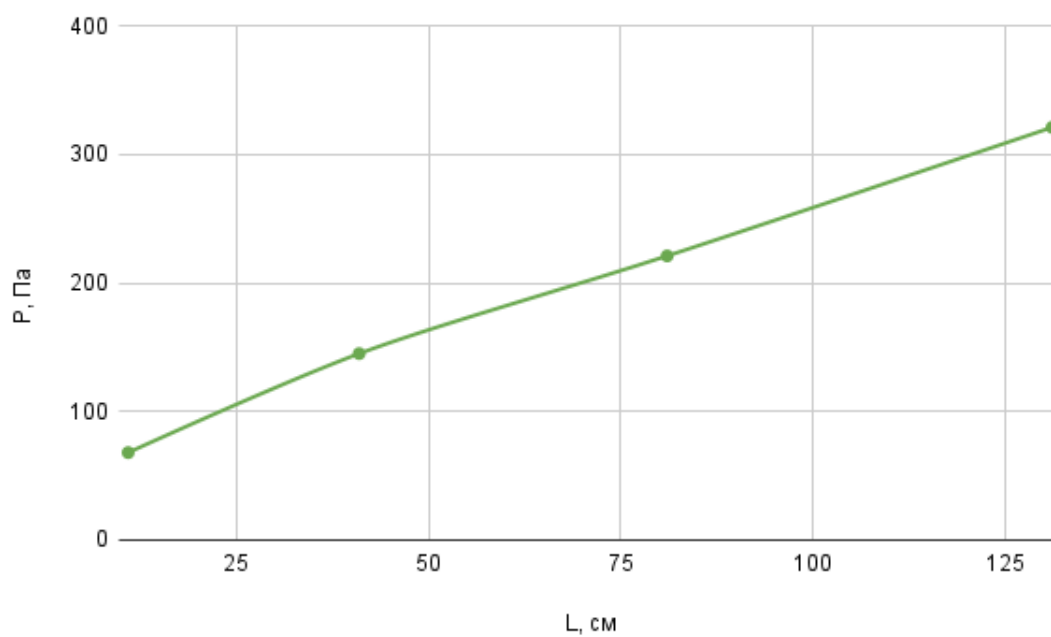
По угловому коэффициенту и формуле (1) можно оценить вязкость воздуха, воспользовавшись МНК аппроксимацией. Она составила  $\eta = (2,05 \pm 0,10q) \cdot 10^{-5}$  Па·с



### Зависимость разности давлений от длины участка

| $t, \text{с}$ | $\Delta P, \text{Па}$ | $L, \text{см}$ | $Q, \text{мл/с}$ |
|---------------|-----------------------|----------------|------------------|
| 30            | 321                   | 131            | 69,6             |
| 30            | 221                   | 81             | 69,9             |
| 30            | 145                   | 41             | 69,5             |
| 30            | 68                    | 11             | 60,7             |

Таблица 1: Результаты измерений разности давлений от расхода



$$Re_{\text{кр1}} = \frac{\rho Q}{\pi R \eta} = 902 \pm 48 \quad Re_{\text{кр1}} = \frac{\rho Q}{\pi R \eta} = 1102 \pm 61$$

## Вывод

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.