

# **Работа 1.3.3**

## **Определение вязкости воздуха по скорости течения через тонкие трубки**

Трунов Владимир Владимирович  
группа Б01-103

17 мая 2022 г.

## Цель работы

Экспериментально выявить участок сформированного течения, определить режимы ламинарного и турбулентного течения; определить число Рейнольдса.

## Введение

### Теоретическая справка

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, и 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:

$$Re = \frac{vr\rho}{\eta} \quad (1)$$

где  $v$  - скорость потока,  $r$  - радиус трубки,  $\rho$  - плотность движущейся среды,  $\eta$  - 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 трубе длиной  $l$ , определяется формулой Пуазейля:

$$Q_V = \frac{\pi r^4}{8l\eta}(P_1 - P_2) \quad (2)$$

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

Отметим условия, при которых справедлива формула (2). 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., то есть менее 1% от атмосферного. Формула (2) выводится для участков трубки, на которых закон распределения скоростей газа по сечению не меняется при движении вдоль потока.

При втекании газа в трубку из большого резервуара скорости слоев вначале постоянны по всему сечению (рис. 1). По мере продвижения газа по трубке картина распределения скоростей меняется, так как сила трения о стенку тормозит прилежащие к ней



Рис. 1. Формирование потока газа в трубе круглого сечения

слои. 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

$$a \approx 0,2r \cdot Re \quad (3)$$

Градиент давления на участке формирования потока оказывается большим, чем на участке с установившимся ламинарным течением, что позволяет разделить эти участки экспериментально. Формула (3) дает возможность оценить длину участка формирования.

## Экспериментальная установка

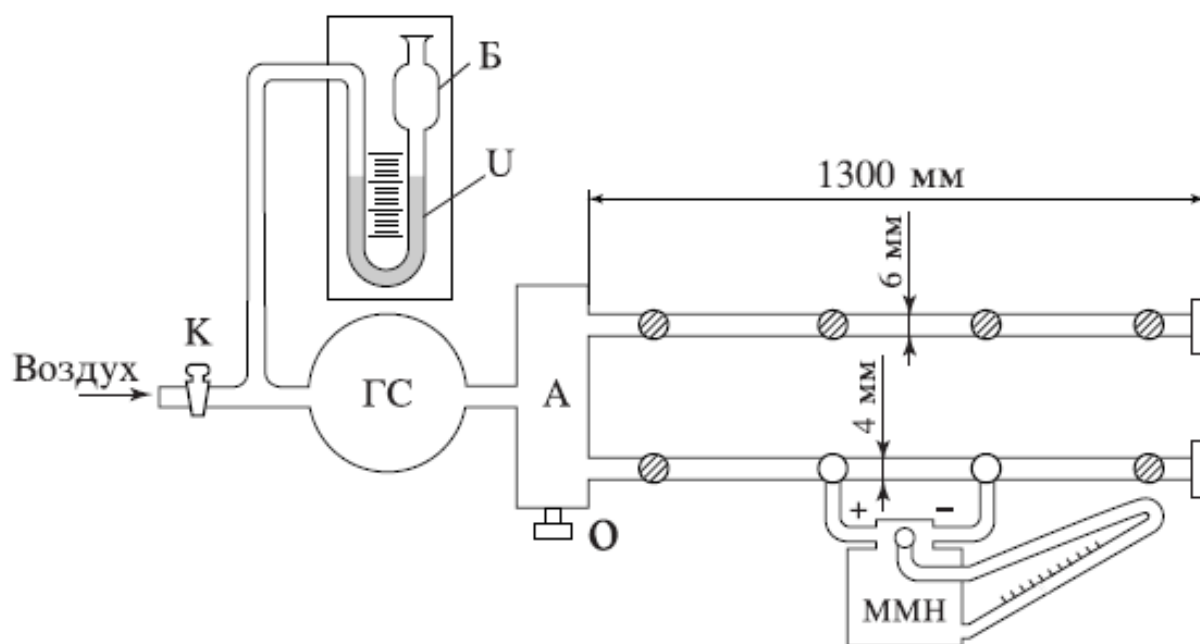


Рис. 2. Схема установки для определения вязкости воздуха

Измерения производятся на экспериментальной установке, схема которой изображена на рис. 2. Поток воздуха под давлением, несколько превышающим атмосферное (на 5-7 см вод. ст.), через газовый счетчик ГС поступает в резервуар А, к которому припаяны тонкие металлические трубки. Примерные размеры трубок указаны на рисунке (точные размеры обозначены на установке). Обе трубки на концах снабжены заглушками, не пропускающими воздух. Во время измерений заглушка открывается только на рабочей трубке; конец другой трубки должен быть плотно закрыт. Перед входом в газосчетчик поставлена U-образная трубка, наполовину заполненная водой. Она выполняет две задачи. Первая - измерение давления газа на входе в газосчетчик. Вторая - предохранение газосчетчика от выхода из строя. Дело в том, что газосчетчик устойчиво работает, если давление газа на его входе не превышает 600 мм водяного столба. Высота U-образной трубки примерно 600 мм, поэтому, когда давление на входе в счетчик превышает 600 мм водяного столба, вода из U-образной трубки выплёскивается в защитный баллон Б и, создавая шум, привлекает к себе внимание экспериментатора.

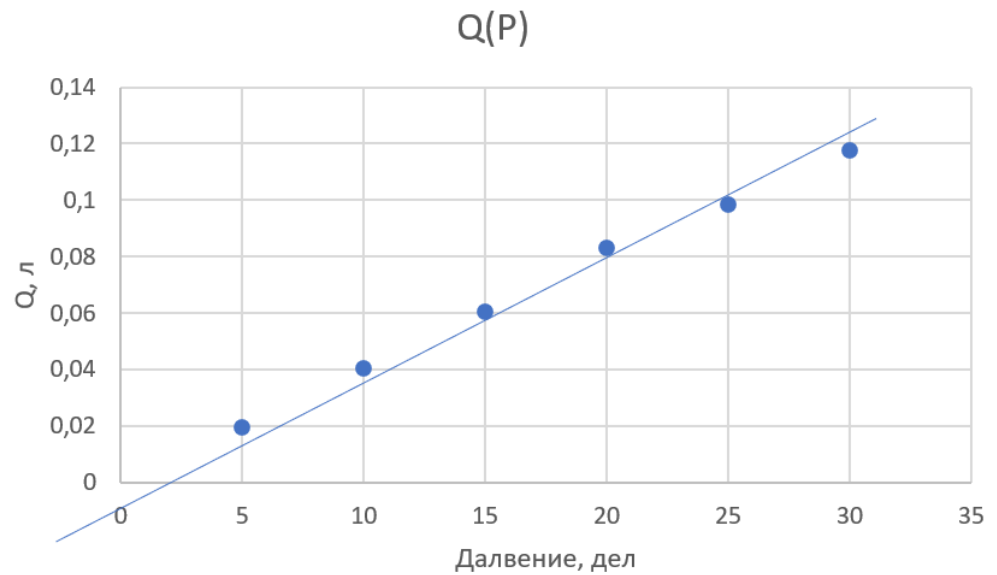
## Ход работы

1. Подготавливаем установку к работе: устанавливаем приборы по уровням, проверяем наличие воды в газовом счетчике по водомерному устройству, устанавливаем на ноль мениск микроманометра. Полный объем измерения проводим на одной из трубок (лучше на трубке  $d = 4$  мм).
2. По формуле (3) оцениваем расстояние, на котором происходит формирование потока при ламинарном течении. Расчет проведем для  $Re = 1000$ .  $a \approx 0,39$  м
3. Подсоединяем микроманометр к двум соседним выводам выбранной трубки на участке со сформировавшимся потоком. Отвинчиваем пробку на конце этой трубки; все остальные выводы на трубках плотно завинчены пробками, снабженными резиновыми прокладками.
4. Медленно открывая кран К (рис. 2) и впуская воздух в установку, внимательно следим за показаниями микроманометра. При больших перепадах давления спирт может вылиться из микроманометра через трубку 11.
5. Измеряем вязкость воздуха. Для этого снимаем зависимость разности давлений  $\Delta P$  от расхода воздуха  $Q = \Delta V / \Delta t$ , при этом  $\Delta V$  измеряется газовым счетчиком, а  $\Delta t$  секундомером. Устанавливаем множитель на стойке 4 равным 0,2. Начинаем с малых перепадов давлений (2-3 мм вод. ст.), постепенно увеличивая расход  $Q$ . В диапазоне от 0 до 100 дел. по шкале 2 должно быть не менее 5-6 точек замера. Это необходимо для того, чтобы заведомо попасть в режим ламинарного течения. После этого замеры можно проводить реже, но в более широком диапазоне по давлению, чтобы попасть в турбулентный режим. По полученным данным строим график  $\Delta P = f(Q)$ . Из формулы (2) видно, что при ламинарном потоке зависимость  $\Delta P$  от  $Q$  должна быть линейной. При возникновении турбулентности линейность графика нарушается: разность давлений растет быстрее, чем расход.
6. Для всех трубок на участках со сформированным течением (в конце трубок) в ламинарном режиме ( $Re < 500$ ) снимаем зависимости  $Q = f(P)$ . Обрабатываем результаты по формуле
7. Давление в лаборатории = 99040 Па, комнатная температура = 299 К. Табличное значение вязкости воздуха  $\eta = (1810)10^{-8}$  Па · с

8.

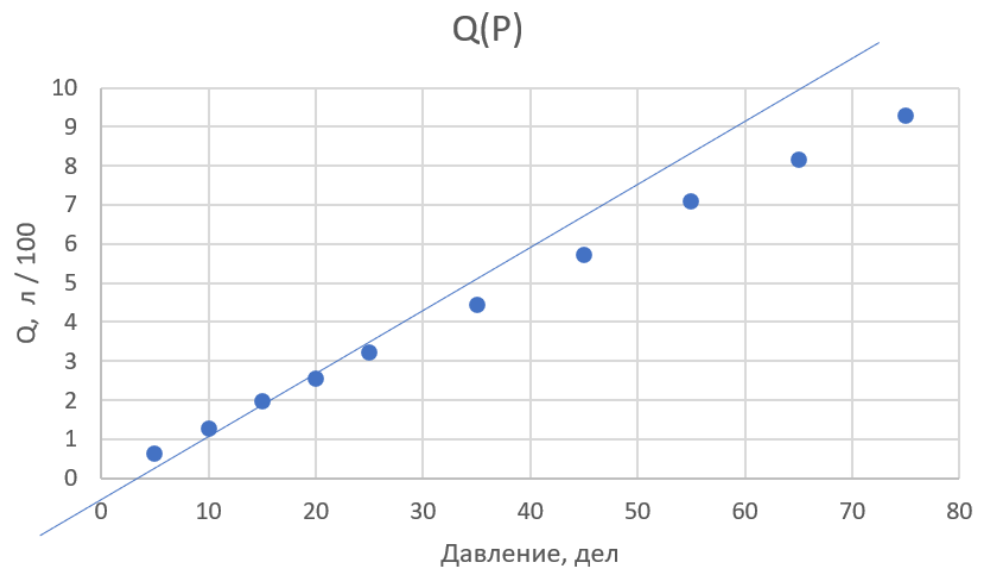
$d = (5,3 \pm 0,5)$ мм		$d = (3,95 \pm 0,05)$ , мм	
$P$ , Дел	$q$ , л/с	$P$ , Па	$Q$ , л/с
5	0,019	5	0,006
10	0,040	10	0,012
15	0,060	15	0,019
20	0,083	20	0,025
25	0,098	25	0,032
30	0,117	30	
35		35	0,044
45		45	0,057
55		55	0,070
65		65	0,081
75		75	0,092

9. Построим графики зависимости расхода от давления для обеих трубок, чтобы определить ламинарные участки и турбулентные.



10. Для широкой:

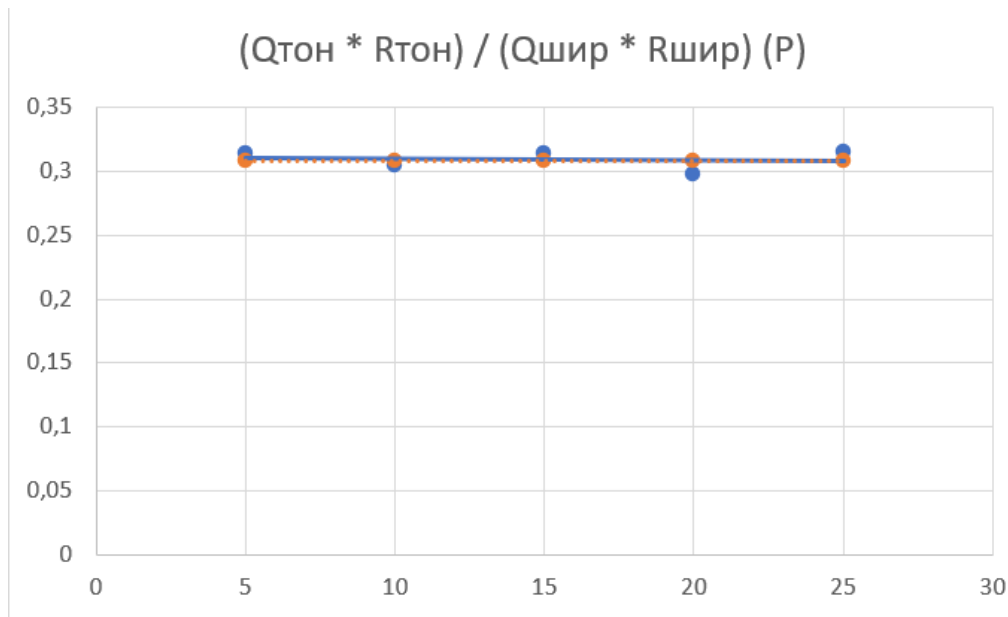
По угловому коэффициенту прямолинейного участка графика определяем вязкость воздуха  $\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8l Q_V}$ . И так  $\eta = (1940 \pm 50) 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$



11. Для тонкой:

По угловому коэффициенту прямолинейного участка графика определяем вязкость воздуха  $\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8l Q_V}$ . И так  $\eta = (1880 \pm 30) 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$

12. Построим график, с помощью которого можно будет посмотреть на чистоту нашего эксперимента. Оранжевые точки - отражают отношение диаметров трубок, синие в свою очередь являются искомым отношением. Видно, что два графика практически совпадают, поэтому наши измерения можно считать достоверными.



13. Оценим длину свободного пробега, диаметр молекулы и число Рейнольдса.  $\lambda = \frac{3\eta}{\rho v}$ ,  
 $\lambda = (1,05)10^{-7}$  м  
 $\sigma = \frac{kT}{\sqrt{2}\lambda p} = \frac{\pi d^2}{4}$ ,  $d = \sqrt{\frac{\sigma}{\pi}}$ ,  $d = (2,99)10^{-10}$  м  
 $Re = \frac{v r \rho}{\eta}$   $Re = 921,3$

## Вывод

В ходе данной работы мы подтвердили нашу первоначальную оценку, получили зависимости расхода от давления, также подсчитали длину свободного пробега, диаметр молекулы воздуха и число Рейнольдса. Полученное значение вязкости воздуха практически совпало с табличным с учетом погрешности. Основной вклад в погрешность внесли измерения времени и давления. Была подтверждена формула Пуазейля для расхода газа при прохождении через трубку.