

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Подкидышев Алексей Сергеевич
Студент факультета инноваций
и высоких технологий
(группа 790)

Лабораторная работа 1.3.3

«Определение вязкости воздуха по скорости течения через
тонкие трубки»

Долгопрудный
19 апреля 2018 г.

1 Описание работы

1.1 Цель работы

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

1.2 Оборудование

Металлические трубки, укрепленные на горизонтальной подставке; газовый счетчик; микроманометр типа ММН; стеклянная U-образная трубка; секундомер.

1.3 Теория

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:

$$Re = \frac{v r \rho}{\eta}$$

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 (называемый расходом), определяется формулой Пуазейля:

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

При втекании газа в трубку из большого резервуара скорости слоев вначале постоянны по всему сечению (рис. 1).

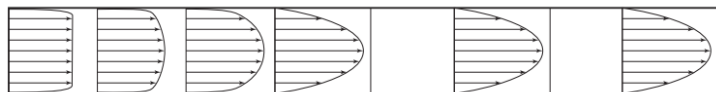


Рис. 1: Схема формирования потока газа в трубке круглого сечения

По мере продвижения газа по трубке картина распределения скоростей меняется, так как сила трения о стенку тормозит прилежащие к ней 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:

$$a \approx 0,2r * Re$$

1.4 Экспериментальная установка

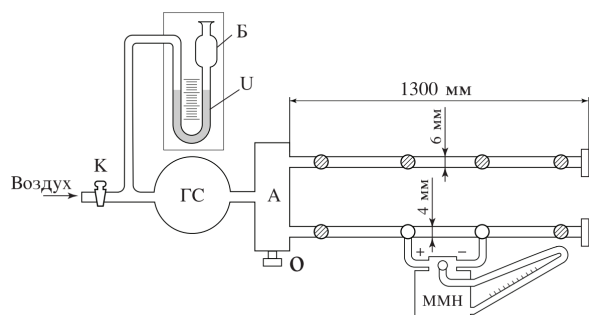


Рис. 2: Схема установки для определения вязкости воздуха

ставлена U-образная трубка, наполовину заполненная водой. Она выполняет две задачи.

Первая - измерение давления газа на входе в газосчётчик. Вторая - предохранение газосчётчика от выхода из строя. Дело в том, что газосчётчик 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 счётчик превышает 600 мм водяного столба, вода из U-образной трубки выплёскивается в защитный баллон Б и, создавая шум, привлекает к себе внимание экспериментатора. Такая ситуация часто создаётся в тех случаях, когда газ подают в систему при закрытых выходах измерительных трубок.

Для измерения давлений в трубках просверлен ряд миллиметровых отверстий. На время опыта к двум соседним отверстиям подсоединяется микроманометр, а остальные плотно закрываются заворачивающимися пробками. Подача воздуха в установку регулируется краном К.

В работе применяется микроманометр типа ММН (рис. 3), позволяющий измерять разность давлений до 200 мм вод. ст. Для повышения чувствительности трубка манометра установлена в наклонном положении. Числа 0,2; 0,3; 0,4; 0,6 и 0,8 (В нашем случае - 0,2) нанесенные на стойке 4, обозначают коэффициент, на который должны быть умножены показания манометра при данном наклоне, для получения давления в миллиметрах водяного столба. Рабочей жидкостью является этиловый спирт. Установка мениска жидкости на нуль шкалы производится путем изменения уровня спирта в сосуде 1 с помощью цилиндра 6. Глубина погружения цилиндра в спирт регулируется винтом 7.

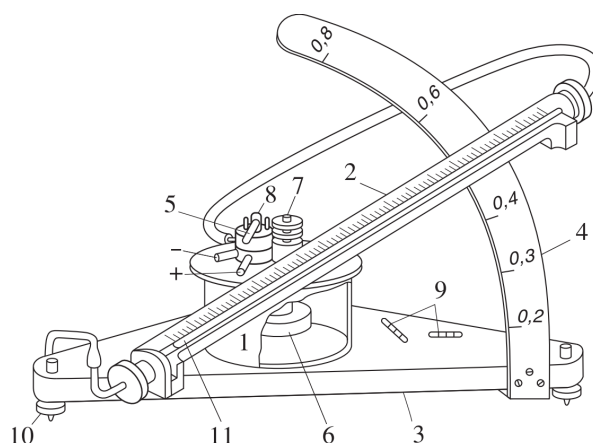


Рис. 3: Микрометрический манометр типа ММН

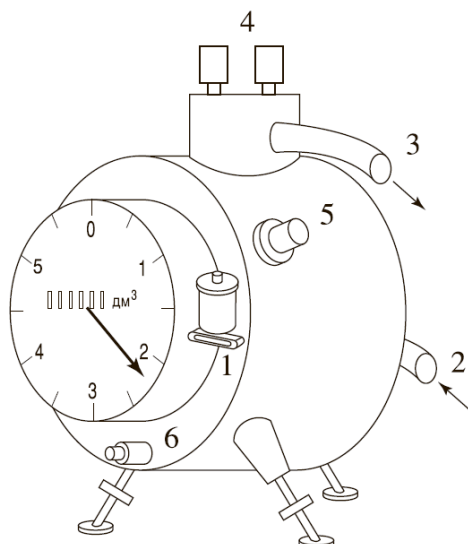


Рис. 4: Внешний вид газового счетчика

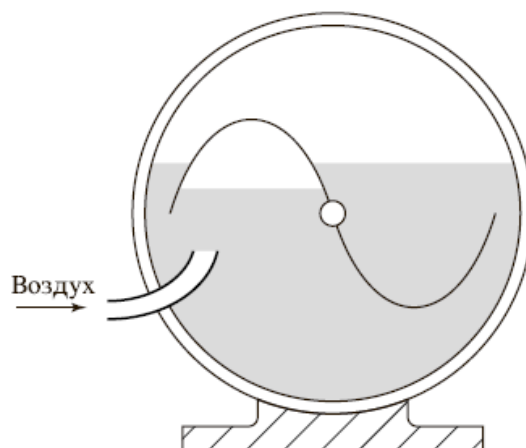


Рис. 5: Схема устройства газового счетчика

Микроманометр снабжен двумя уровнями 9, расположенными на плите 3 перпендикулярно один другому. Установка прибора по уровням производится двумя регулировочными ножками 10.

Газовый счетчик служит для измерения небольших количеств газа. Внешний вид его изображен на рис. 4. Корпус газового счетчика представляет собой цилиндрический баллон, на передней торцевой стенке которого находятся счетно-суммирующий механизм и шкала со стрелкой. Один оборот стрелки соответствует 5 л газа, прошедшего через счетчик.

Газовый счетчик заливается водой до уровня, определяемого по во домерному устройству 1. Трубка 2 для входа газа расположена сзади счетчика, а трубка 3 для выхода газа наверху счетчика. Патрубки 4 предназначены для присоединения U-образного манометра, а патрубок 5 для установки термометра. Кран 6 служит для слива воды. Счетчик снабжен уровнем и регулировочными ножками для правильной установки.

Принцип работы счетчика пояснен на рис. 5. На оси, проходящей по осевой линии цилиндра, жестко укреплены легкие чаши (для упрощения чертежа на рисунке изображены только две чаши). В чашу, находящуюся над трубкой 2, поступает воздух. Когда чаша наполняется воздухом, она всплывает, ее место занимает следующая, и т. д. Вращение оси передается счетно-суммирующему устройству.

2 Ход работы

2.1 Подготовка

2.1.1 Оценим расстояние, на котором происходит формирование потока при ламинарном течении:

Трубка, №	$d_{\text{трубки}}$, mm	$a_{\text{посчитанное}}$, cm	$a_{\text{действительное}}$, cm
1	3,85	38,5	81
2	3	30	46
3	2.6	26	40

Таблица 1: Таблица демонстрирующая, что наши измерения проводилось именно на участках ламинарного течения

Давление, измеряемое **спиртовым** микроманометром, определяется по формуле:

$$P = K * h * 9,80665 \text{ в нашем случае } K = 0.2$$

2.2 Измерения

Q, литр/с	Δp , mm	Δp , Pa
0,016	15	29,42
0,032	29	56,88
0,053	46	90,22
0,07	64	125,53
0,09	83	162,79
0,09	95	186,33
0,10	118	231,44
0,12	175	343,23
0,13	213	417,76
0,15	282	553,1
0,11	132	258,90
0,07	64	125,52

Таблица 2: Измерим вязкость воздуха. Для этого на Трубке №1 снимем зависимость разности давлений от расхода газа

2.3 Зависимость $\Delta P = f(Q)$. Подсчет Re

По полученным данным построим график $\Delta P = f(Q)$

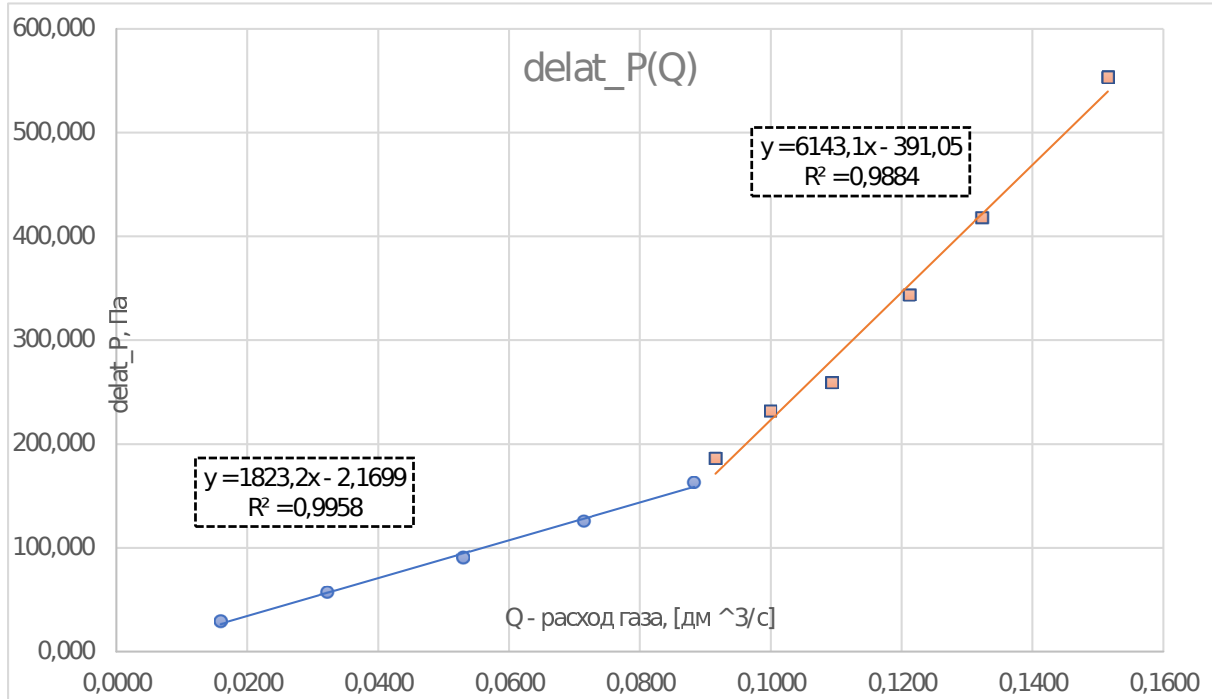


Рис. 6: График зависимости ΔP от Q , для $d \approx 3,85$ (Трубка №1)

Выразим искомую вязкость через коэффициент наклона прямой α

$$h = \eta * \frac{8l}{\pi r^4 K * 9,80665} Q = \alpha Q$$

$$\eta = \frac{\pi r^4 K * 9,80665 \alpha}{8l}$$

$$l = (50,0 \pm 0,1) \text{ см}$$

$$r = (1,925 \pm 0,03) \text{ см}$$

$$\eta = (1,96) * 10^{-5} \text{ кг*м/с}$$

Из графика видно, что ламинарный режим переходит в турбулентный на значениях $(9 \leftrightarrow 10) * 10^2 \text{ дм}^3/\text{с}$

$$Re = \frac{Q r \rho}{S \eta}$$

$$Re = (980 - 1100)$$

$$Re = 1040 \pm 60$$

2.4 Распределение давление внутри трубки

При расходе, заведомо обеспечивающем ламинарность потока измерим распределение давления вдоль трубки:

l, см	0	10,5	40,5	80,5	130,5
h, дел	0	16	36	59	88

Таблица 3: Измерим разности давлений воздуха на различных участках Трубки №1

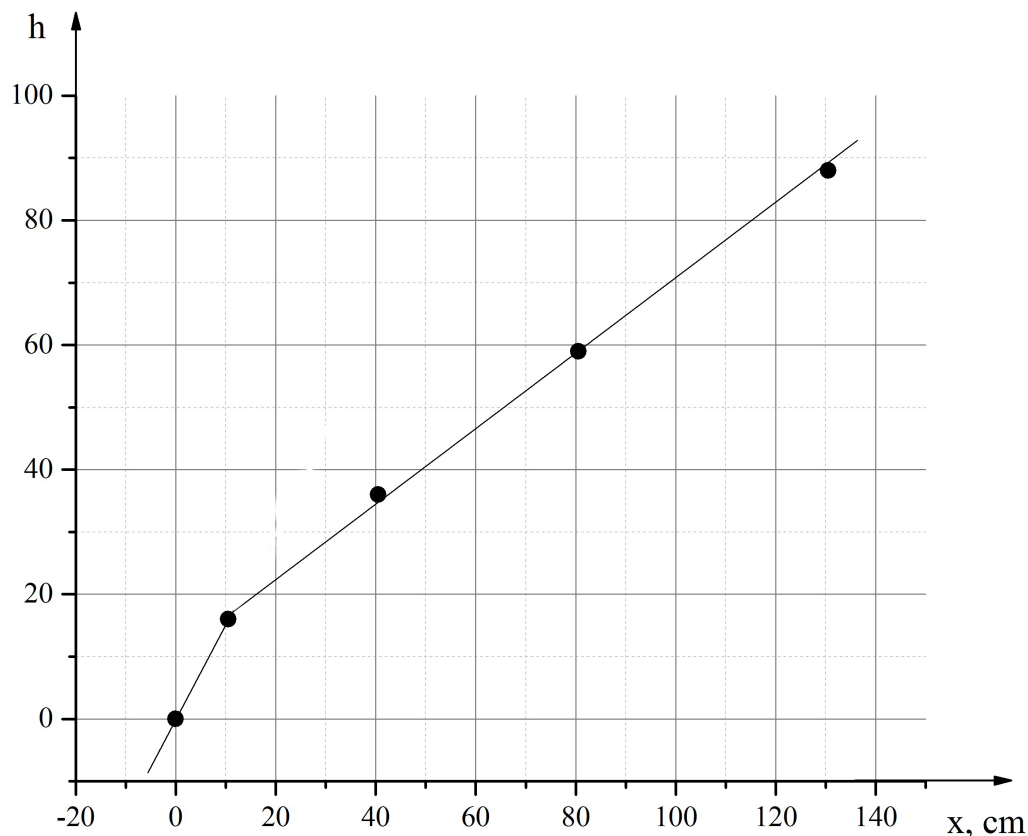


Рис. 7: График зависимости давления(p) от расстояния(l)

Из графика видно, что установление потока происходит еще на 1-ом участке длиной 10,5 см. Теоретические расчеты дали длину установления порядка 40 см. То есть оценка, полученная по формуле, гораздо более грубая, чем результат, который мы наблюдаем в эксперименте.

3 Обработка результатов

3.1 Измерения зависимости Q от P на разных трубках

3.1.1 Вывод необходимых формул

Проверим формулу Пуазейля. Для этого на концах двух труб снимем зависимость $Q(P)$. Исходя из результатов предыдущего опыта можно утверждать, что поток на этих участках ламинарен, а значит имеет место формула:

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

Так как для каждой трубы поток *ламинарен*:

$$\ln\left(\frac{8l\eta}{\pi} * k\right) = n * \ln r$$

Для всех трубок проведем измерения зависимости Q от P и обработаем их по формуле

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

$$\ln\left(\frac{8l\eta Q}{\pi(P_1 - P_2)}\right) = n \ln r$$

3.1.2 Измерения

$C, 10^{11}$	$\ln(C)$	$r, \text{ mm}$	$\ln(r)$
1,37	-25,01	1,93	-6,253
4,75	-23,77	2,63	-5,943

Рис. 8: Таблица измерений зависимости Q от P в Трубке №1 и Трубке №2

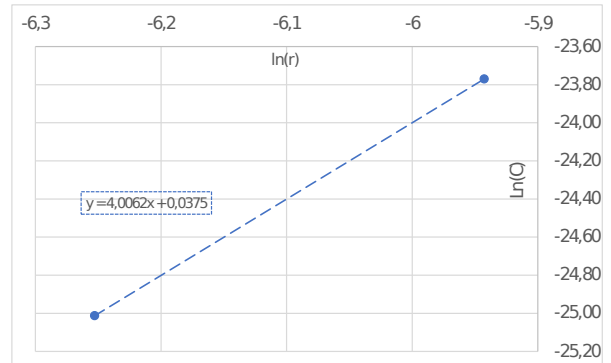


Рис. 9: График зависимости $Q = f(P)$, построенный в логарифмическом масштабе

Значение n - показателя $r \approx 4$, что соответствует теории

3.2 Погрешности

3.2.1 При подсчете коэффициента линейной зависимости из графика $\Delta P(Q)$

$$\sigma_a \approx \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{(\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2)}{(\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2)}} - a^2 \quad (1)$$

Тогда погрешность при измерении коэффициента вязкости η :

$$\sigma_{\eta} = \eta * \sqrt{4 \cdot \left(\frac{\sigma_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^2}$$

В итоге:

$$\sigma_a \approx 0,02 * 10^6$$

Значит $\eta = (\Pi * r^4) / 8l * a$:

$$\sigma_{\eta} \approx 0.1 * 10^{-5}$$

3.2.2 При измерении $Q = f(P)$ в логарифмическом масштабе

Используя аналогичную формулу формулу(№1):

$$\sigma\left(\frac{Q}{\Delta P}\right) \approx 1,051$$

4 Вывод

$$\eta = (1,96) * 10^{-5} \text{ кг*м/с} \quad Re = 1040 \pm 60 \quad n = 4 \pm 0,07$$

- На графике $\Delta P(Q)$ четко видно начало турбулентности и линейная зависимость на ламинарном участке.
- Полученное экспериментальное значение имеет небольшую относительную погрешность, лежит в пределах погрешности от табличного, что говорит об удачном проведении опыта.
Данная лабораторная работа поражает точностью результатов. (Схожестью теоретических и экспериментальных результатов)
- Число Рейнольдса, полученное в результате опыта имеет соответствующее для переходного от ламинарного к турбулентному потоку значение.
- Опытным путем установлен показатель степени $r \approx 4$.