

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ МОСКОВСКИЙ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ФИЗТЕХ-ШКОЛА ФИЗИКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ ИМ.ЛАНДАУ (ЛФИ)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО ФИЗИКЕ

Работа №1.3.3

"Измерение вязкости воздуха по
течению в тонких трубках"

Студента 1 курса группы Б02-106
Шкиндерова Данилы Алексеевича

Долгопрудный, 2022

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

В работе используются: 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.

Теоретическое введение и схема установки

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, ρ — плотность движущейся среды, η — 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 трубе длиной l , определяется формулой Пуазейля:

$$Qv = \frac{\pi r^4}{8l\eta}(P_1 - P_2). \quad (1)$$

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 (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.

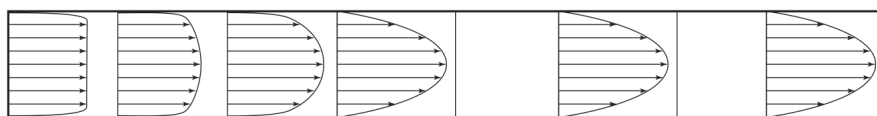


Рис. 1: Формирование потока газа в трубке круглого сечения

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

$$a \approx 0.2r \cdot Re. \quad (2)$$

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

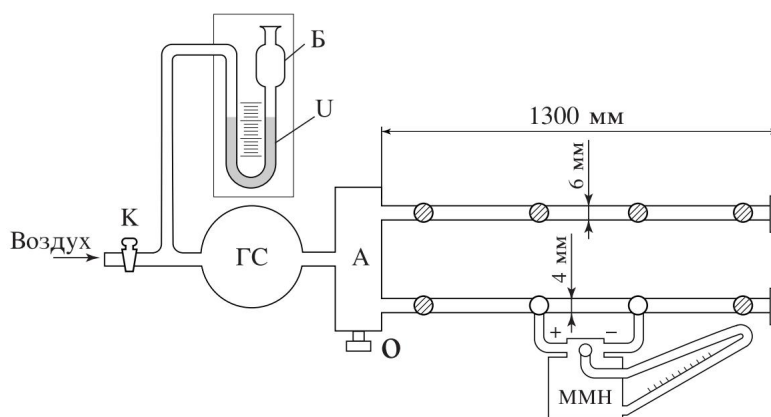


Рис. 2: Схема установки

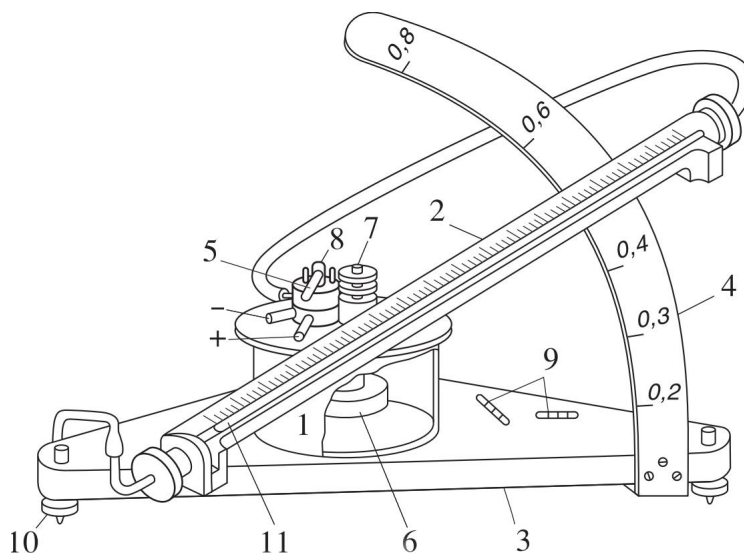


Рис. 3: Подробная схема микроманометра

Снятие измерений

1. Подготовим установку к работе:

а. ознакомимся с устройством и характеристиками приборов (газового счетчика и спиртового микроманометра); проведем их предварительную настройку и регулировку согласно техническому описанию установки;

б. ознакомимся с измерительными шкалами приборов, запишем рабочий диапазон и цену деления; предварительно оценим инструментальные погрешности (по паспортам приборов и/или по цене деления их шкал).

2. Проведем предварительный запуск установки и убедимся в ее работоспособности.

а. Подсоединим манометр к двум соседним выводам на конце одной из трубок. Убедимся, что все отверстия, кроме одного — выходного — плотно завинчены пробками.

б. Убедимся, что кран К, соединяющий компрессор с установкой, закрыт. Включим компрессор. Переведем рычажок микроманометра в рабочее положение (+).

в. Медленно приоткрывая кран К и непрерывно контролируя показания микроманометра, создадим небольшой поток воздуха через трубку

г. Пронаблюдаем за показаниями приборов в зависимости от интенсивности потока через трубку. Убедимся, что при неизменном положении крана К показания манометра стабильны, а стрелка расходомера вращается равномерно.

3. Измерим параметры окружающей среды: температуру (21.2°C), влажность воздуха (70%) и атмосферное давление (756 мм рт.ст.). Запишем диаметры трубок ((5.10 ± 0.05) мм, (3.95 ± 0.05) мм). Зарисуем схему расположения измерительных отверстий на трубках с указанием расстояний между ними.

4. Рассчитаем значение расхода $Q_{\text{кр}} \approx 0.1$ л/с, при котором число Рейнольдса трубке станет равным критическому $Re_{\text{кр}} \approx 10^3$. Для предварительной оценки примем вязкость воздуха равной $2 \cdot 10^{-5}$ Па·с, плотность воздуха определим по уравнению идеального газа. В качестве характерной скорости потока используем её среднее значение.

5. Измерим зависимости перепада давления на выбранном участке трубки от расхода газа Q

а. Постепенно увеличивая расход, проведем измерения так, чтобы на ламинарный режим течения приходилось 7–9 экспериментальных точек.

б. Получим также 7–9 экспериментальных точек в турбулентном режиме, меняя давление от граничного до максимально возможного. В процессе измерений будем менять шкалу манометра, но в таблице, все пересчитано в изначальную.

6. Измерим распределение давления газа вдоль трубки $P(x)$. Установим поток воздуха через трубку, близкий к критическому, но всё ещё сохраняющий ламинарность. Не меняя расход Q, последовательно подсоединим манометр ко всем парам выводов исследуемой трубки и измерим соответствующие перепады давлений.

7. Повторим все измерения для остальных трубок и запишем результаты в таблицы 1 и 2.

8. Измерим зависимость расхода от радиуса трубы при заданном градиенте давления.

а. Подберем некоторое значение градиента давления (перепада давления на единицу длины трубы) $\Delta P/l = 0.98$ Па/см, при котором обеспечивается ламинарность потока на всех трубках. Проводя измерения поочередно на каждой трубке, подберем величины расхода, при которых градиент давления равен выбранному.

б. Подберем некоторое максимальное значение градиента давления $\Delta P/l = 6.27$ Па/см, достижимое на всех трубках в турбулентном режиме. Аналогично измерим значения Q для каждой трубки, при которых градиент давления равен выбранному. Все измерения запишем в таблицу 3.

Таблица 1: **Измерение зависимости $\Delta P(Q)$**

Трубка диаметром 3.95 мм										
Q , мл/с	12.52	27.59	40.34	53.75	64.82	75.91	84.54	91.16	98.18	104.38
ΔP , дел	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
	113.25	118.76	124.22	131.30	138.39	164.86	189.35	210.58	235.73	-
	240	280	320	360	400	560	720	880	1080	-
Трубка диаметром 5.10 мм										
Q , мл/с	17.90	33.15	49.75	65.98	80.52	95.97	109.68	121.13	127.29	170.57
ΔP , дел	10	20	30	40	50	60	70	80	90	160
	224.15	274.07	-	-	-	-	-	-	-	-
	280	406	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 2: **Измерение зависимости $P(x)$**

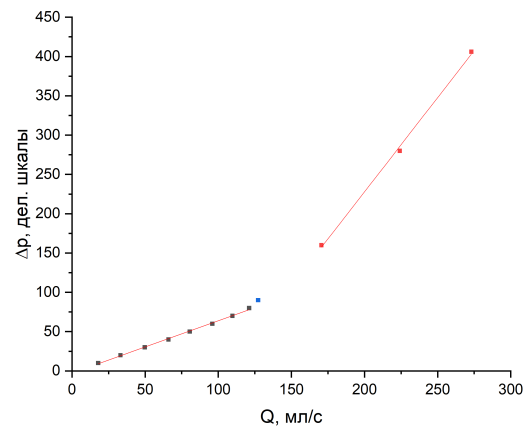
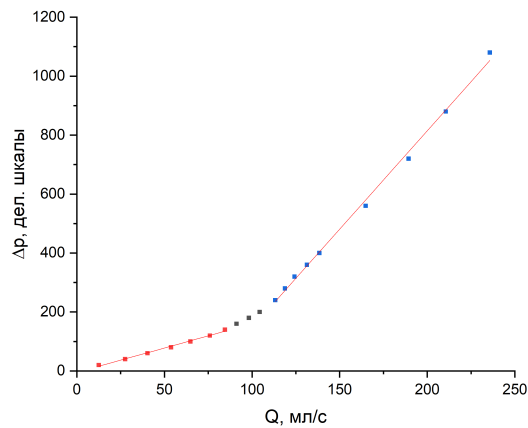
Трубка диаметром 3.95 мм, $Q = 82.5$ мл/с				
x , см	10.9	40.9	80.9	130.9
P , Па	82.3	186.2	313.6	450.8
Трубка диаметром 5.10 мм, $Q = 105.7$ мл/с				
x , см	10.9	40.9	80.9	130.9
P , Па	52.9	94.1	121.5	182.3

Таблица 3: **Измерения при одинаковых градиентах давления**

Ламинарное течение			
d , мм	3.00	3.95	5.10
Q мл/с	11.5	31.0	105.7
Турбулентное течение			
d , мм	3.00	3.95	5.10
Q мл/с	57.7	119.0	268.8

Обработка результатов измерений

1. Построим графики зависимостей $\Delta P(Q)$ от перепада давления (4 мм, 5 мм):



Проанализируем полученные результаты:

- Для каждой трубки по графику (по пересечению линий для ламинарного и турбулентного течений) определим $Q_{кр}$: 103 мл/с и 144 мл/с соответственно
- Убедимся, что зависимости на ламинарном участке линейные
- По МНК найдем угловые коэффициенты: (1.65 ± 0.06) дел·с/мл и (0.666 ± 0.013) дел·с/мл соответственно. Используя формулу Пуазейля найдем коэффициенты вязкости:

$$k = \frac{\Delta P}{Q} = \frac{8\eta L}{\pi R^4} \rightarrow \eta = k \cdot \frac{\pi R^4}{8L}$$

Значит: $3.867 \cdot 10^{-5}$ Па·с и $4.338 \cdot 10^{-5}$ Па·с

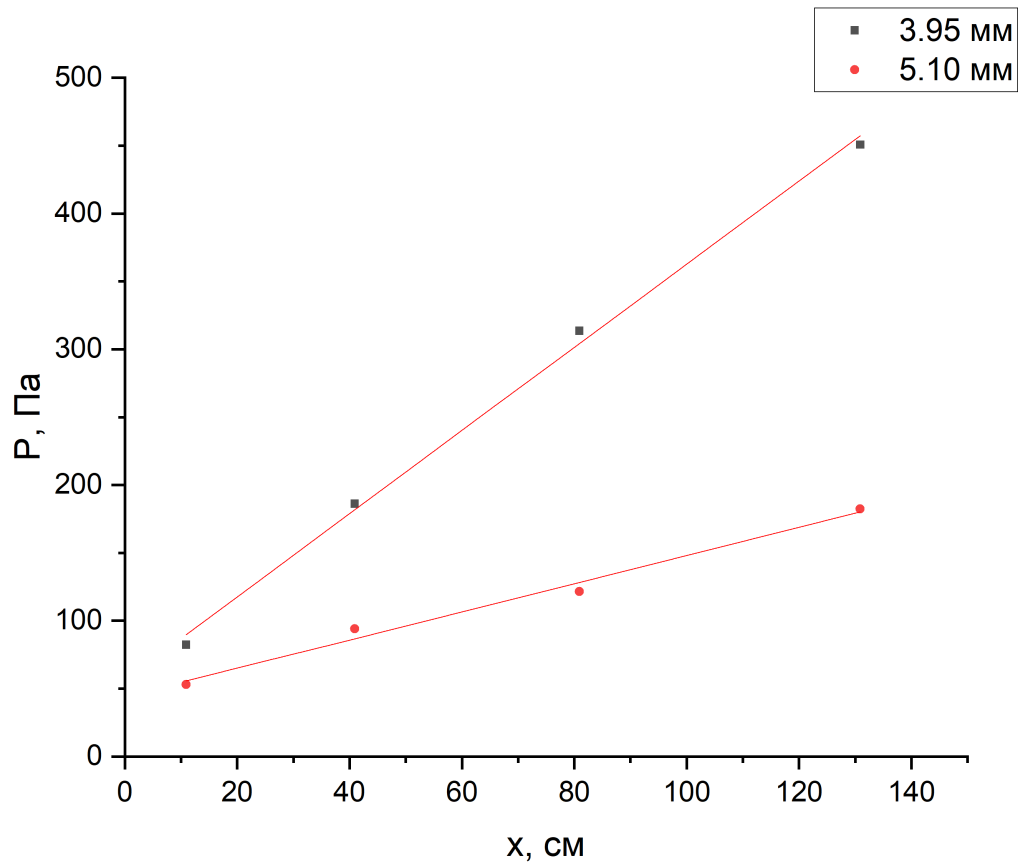
г. Рассчитаем критическое число Рейнольдса: 1030 и 994. Сходится с общепринятым значением $\approx 10^3$.

д. Рассчитаем погрешности коэффициентов вязкости. Поскольку расход воды и давление измерялись с довольно большой точностью (в большинстве случаев $\varepsilon < 1\%$), случайная погрешность k равна полной. Тогда:

$$\sigma_\eta = \eta \sqrt{\varepsilon_k^2 + 16\varepsilon_R^2 + \varepsilon_L^2}$$

В итоге, коэффициенты вязкости равны: $(3.87 \pm 0.24) \cdot 10^{-5}$ Па·с и $(4.34 \pm 0.19) \cdot 10^{-5}$ Па·с. Как видно, они сходятся между собой в пределах погрешности, но примерно в два раза отличаются от табличного значения.

2. Построим графики $P(x)$:

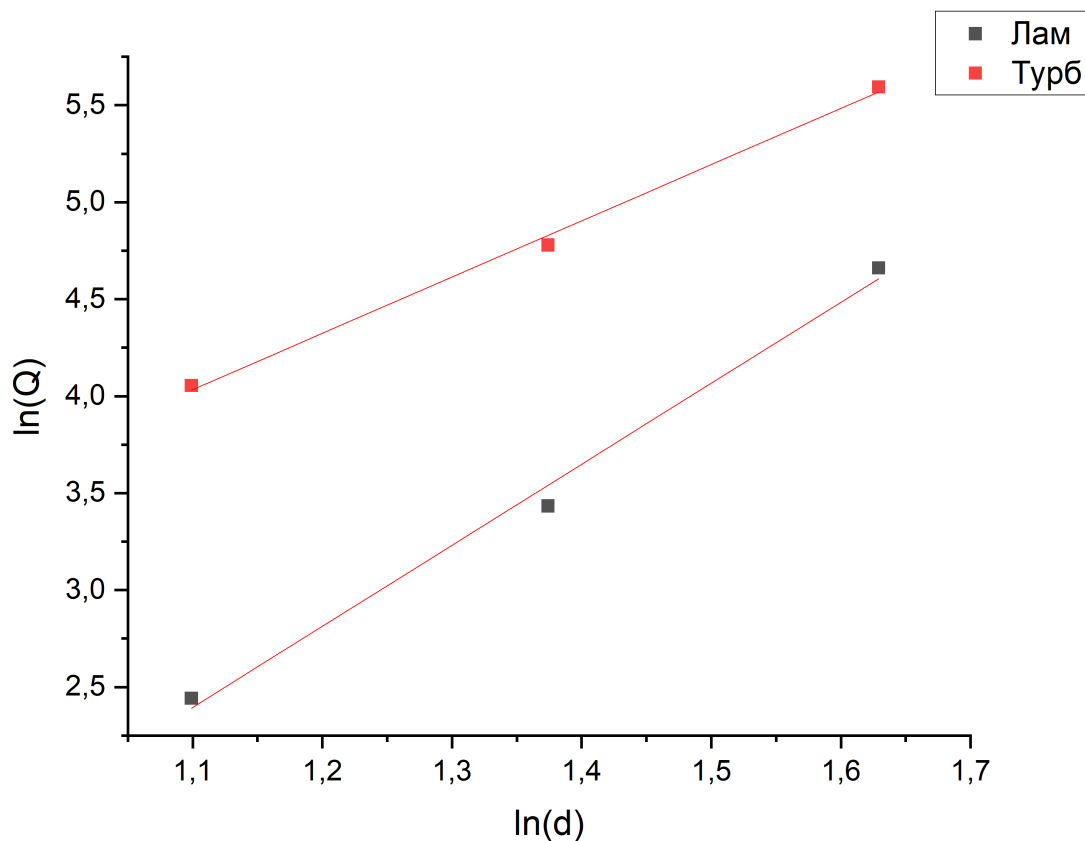


Как видно, определить, где поток устанавливается довольно сложно, поскольку все точки ложатся на прямую, а расстояния между ними большие. Но мы можем получить теоретическую оценку по формуле:

$$l_{\text{уст}} = 0.2 \cdot r \cdot Re \approx 40 \text{ см и } 50 \text{ см соответственно}$$

3. По результатам измерений п. 8 убедимся, что расход в ламинарном режиме пропорционален четвертой степени радиуса трубы $Q \sim R^4$, и проверим, выполняется ли зависимость расхода от радиуса $Q \sim R^{2.5}$ в турбулентном режиме.

Изобразим результаты на графике в двойном логарифмическом масштабе. Наклон полученной прямой будет соответствовать показателю степени зависимости.



Получаем коэффициенты: (4.2 ± 0.3) для ламинарного течения и (2.90 ± 0.16) для турбулентного. Как видно, первое значение сходится с теоретическим в пределах погрешности, а второе довольно близко к теоретическому.

Вывод

В данной лабораторной работе мы экспериментально подтвердили наличие ламинарного и турбулентного режимов течения воздуха и определили критическое число Рейнольдса, совпавшее с верным значением.

Также был измерен коэффициент вязкости, но он не сошелся с табличным значением.

Ещё был исследован профиль давления, который, как и ожидалось, оказался линейным, и вычислены показатели степеней в формуле Пуазейля и формуле для турбулентного течения, которые также с неплохой точностью сошлись с теорией.