

Московский физико-технический институт (МФТИ-Физтех)

Лабораторная работа № 1.3.3:
Измерение вязкости воздуха по течению в тонких трубках

Иванов Артём, Б05-409

3 апреля 2025 г.

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.

1 Теоретическая часть

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 трубке длиной l , определяется формулой Пуазейля:

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

В этой формуле $P_1 - P_2$ – разность давлений в двух выбранных сечениях 1 и 2, расстояние между которыми равно Δl . 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.

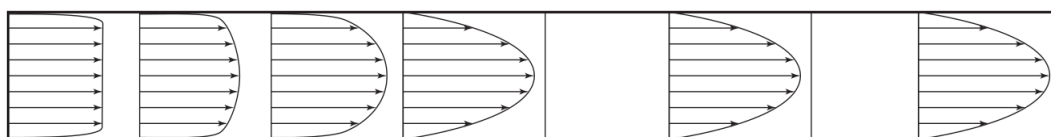


Рис. 1: Формирование потока газа в трубке круглого сечения

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

$$a \approx 0.2rRe \quad (2)$$

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.

2 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.

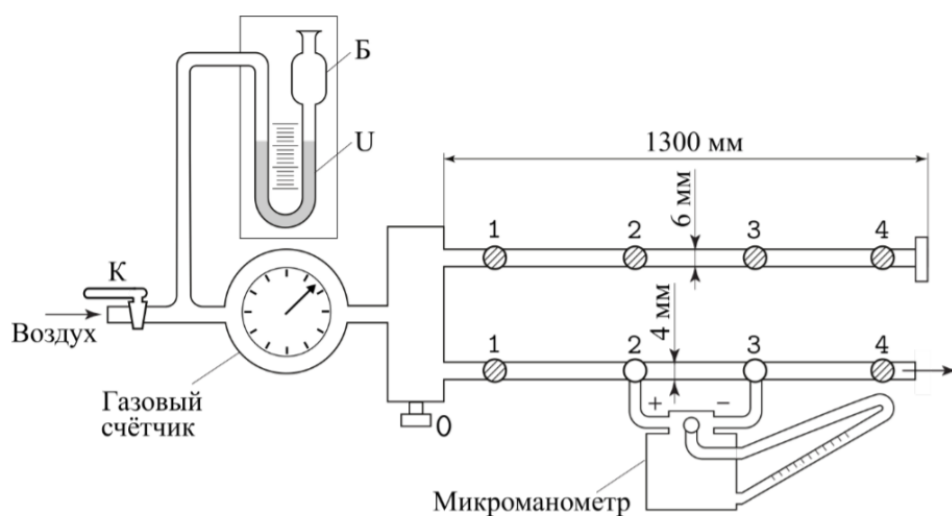


Рис. 2: Экспериментальная установка

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 (~ 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 ΔV прошедшего через систему. Измеряя время Δt 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 ρ).

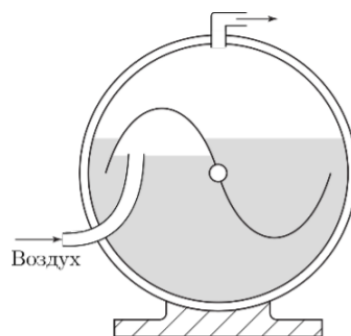


Рис. 3: Газовый счетчик

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.

3 Обработка результатов измерений

Эксперимент проводился при комнатной температуре $T_{\text{комн}} = 296,2\text{K}$, при атмосферном давлении $P_{\text{атм}} = 101,75$ 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.

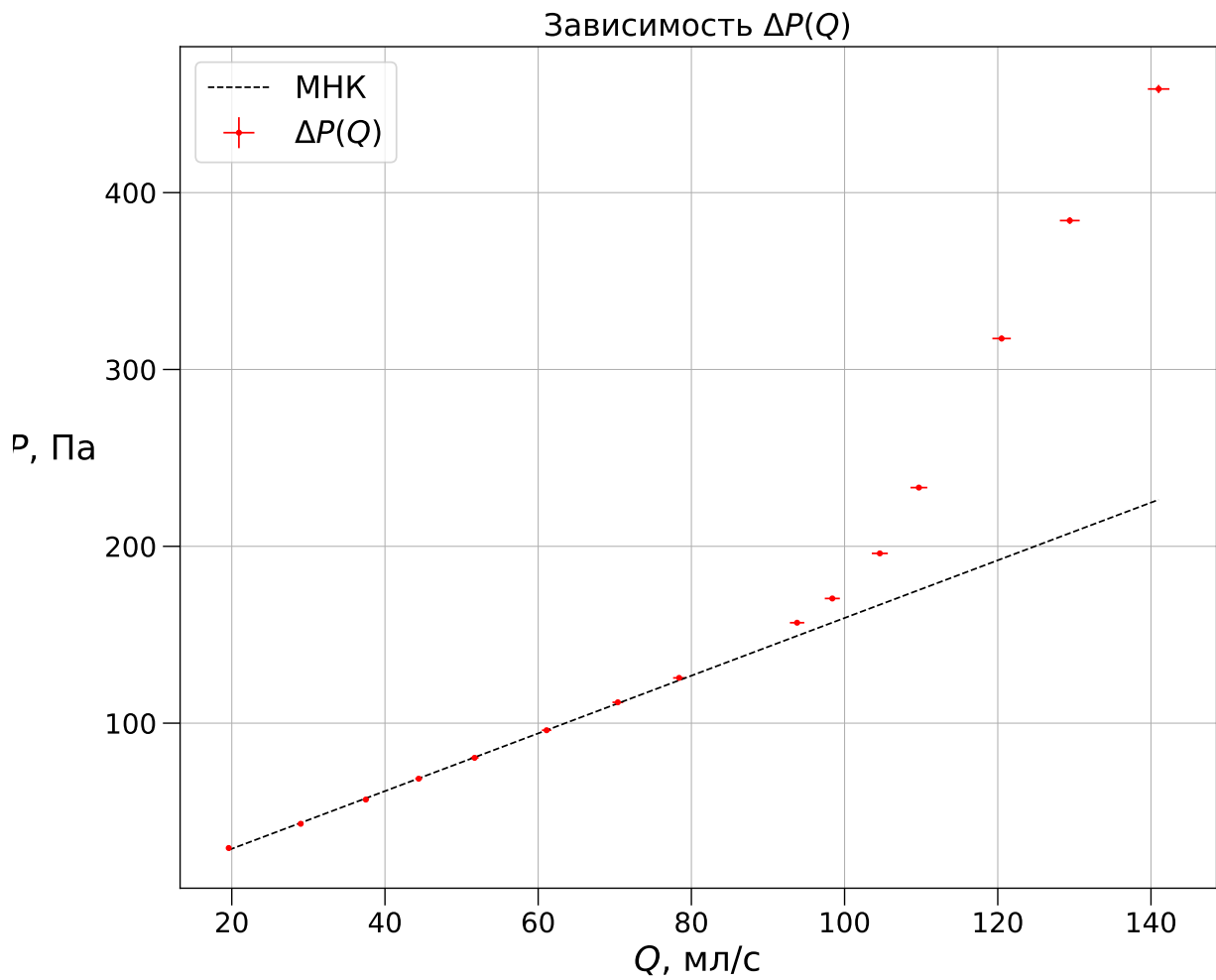
3.1 Зависимость разности давлений от расхода

Эксперимент проводился на первой трубе с диаметром $d_1 = 3,95 \pm 0,05$ мм. Данные измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1: Результаты измерений разности давлений от расхода

h , мм	ΔV , л	Δt , с	ΔP , Па	Q , мл/с
15	3	153,4	29,4	19,6
22	3	103,5	43,1	29,0
29	3	81,0	56,8	37,5
35	4	91,0	68,6	44,4
41	3	58,1	80,4	51,7
49	3	49,1	96,0	61,1
57	4	56,8	111,8	70,4
64	4	51,0	125,6	78,4
80	5	53,3	156,8	93,8
87	5	50,8	170,5	98,4
100	7	66,9	196	104,6
119	8	72,9	233,2	109,7
162	8	66,4	317,5	120,5
196	8	61,8	384,2	129,4
234	9	63,8	458,6	141,0

По результатам измерений был построен график 3.1. По угловому коэффициенту и формуле (1) можно оценить вязкость воздуха. Она составила $\eta = 1,95 \pm 0,03 \times 10^{-5}$ Па·с.



3.2 Зависимость разности давлений от длины участка

Здесь измерения проводились на трубах 1 и 2 с диаметрами $d_1 = 3,95 \pm 0,05$ мм и $d_2 = 5,10 \pm 0,05$ мм, с расходами $Q_1 \approx 82,5$ мм/с и $Q_2 \approx 105,7$ мл/с соответственно.

3.3 Зависимость разности давлений от длины

Результаты измерений приведены в таблице 2. По этим данным был построен график 3.3, из которого следует, что ламинарное течение устанавливается не раньше 41 см.

Таблица 2: Зависимость давления от длины

$Q = 82,5 \text{ мл/с}, d = 3,95 \text{ мм}$	
$x, \text{ см}$	$\Delta P, \text{ Па}$
10,9	82,3
40,9	186,2
80,9	313,6
130,9	450,8

$Q = 105,7 \text{ мл/с}, d = 5,10 \text{ мм}$	
$x, \text{ см}$	$\Delta P, \text{ Па}$
10,9	52,9
40,9	94,1
80,9	121,5
130,9	182,3

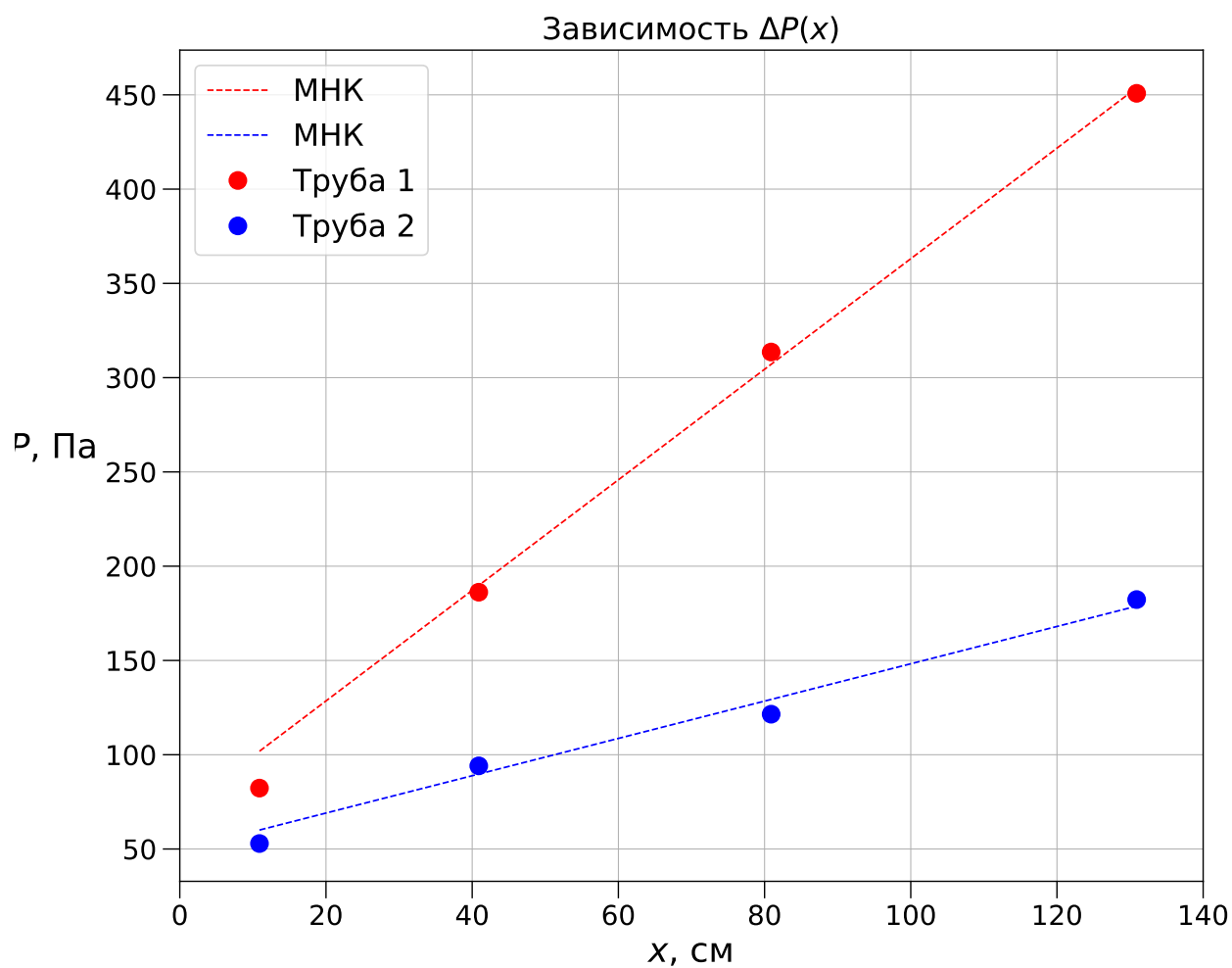


Рис. 4: Зависимость разности давлений от длины

3.4 Зависимость расхода от диаметра трубы

Данные измерений приведены в таблицах. Для измерения зависимости в ламинарном течении было выбрано значение $dP/dl = 0,98$ Па/см. Для турбулентного течения – $dP/dl = 6,27$ Па/см.

Таблица 3: Зависимость расхода от градиента давления

Ламинарное теч.	
Q , мл/с	d , мм
31	3,95
11,5	3
105,7	5,10

Турбулентное теч.	
Q , мл/с	d , мм
119	3,95
57,7	3
268,8	5,10

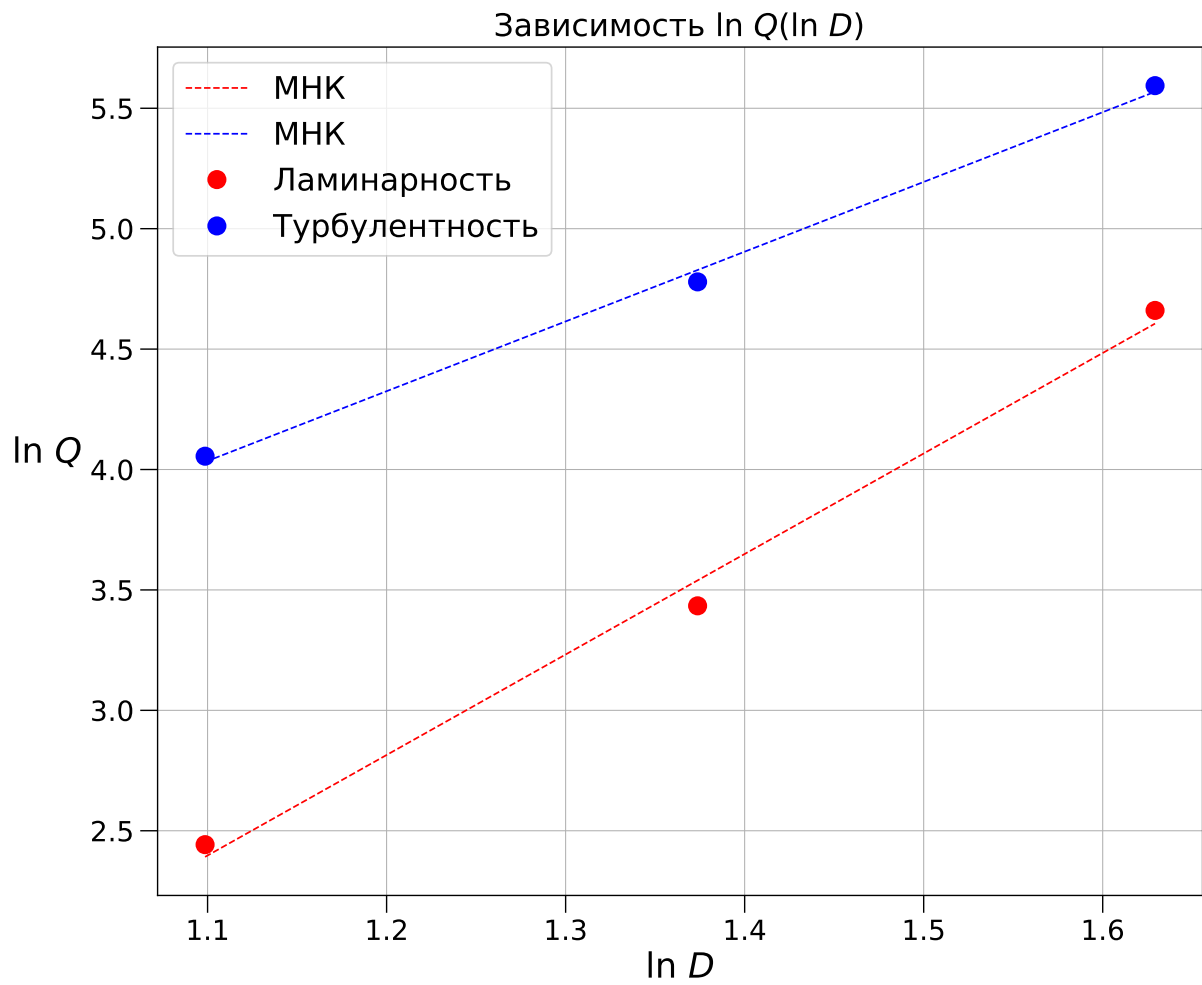


Рис. 5: Зависимость расхода от градиента давления

Из графика видно, что для турбулентного течения всё выполняется хорошо и расход пропорционален радиусу в степени 2,5. С ламинарным же течение зависимость не подтвердилась, показав степень 3,5. Это может говорить о неправильном теоретическом приближении.