

ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Кафедра общей физики

Лабораторная работа 1.3.3

Измерение вязкости воздуха по течению в тонких трубках

Преподаватель: доцент Игуманов А.Ю.

Обучающийся: Готов А.А.

Долгопрудный
2022

Введение

Аннотация

Данная работа посвящена изучению воздуха по прямой трубе тонкого сечения. Используются следующие методы измерений: анализ графиков зависимости $Q(\Delta P)$, а также линеаризованных графиков зависимостей $Q(R)$. Расход газа измеряется с помощью газового счётчика и секундомера, перепад давления в трубке - с помощью микроманометра.

Цели 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

Приборы и материалы

- Система подачи воздуха (компрессор, подводящие трубки)
- Набор трубок различного диаметра с выводами для подсоединения микроманометра
- Секундомер: $\Delta_{\text{сек}} = 0.4\text{с}$ (удвоенное среднее время реакции человека)
- Газовый счетчик ГСБ-400

Устройство

1. Измерительная шкала (1 оборот = 5 л)
2. Счётно-суммирующее устройство (1 ед. = 1 л)
3. Индикатор горизонтального уровня
4. Водомерное устройство
5. Трубка для подачи газа
6. Трубка для отвода газа
7. Патрубки для подключения внешнего манометра
8. Место установки термометра
9. Регулируемые ножки
10. Сливное отверстие

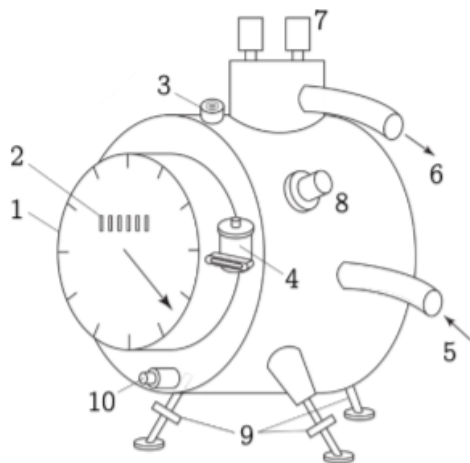


Рис. 1: Схема газового счетчика

Характеристики

- Класс точности: 1,0
- Пределы измерения расхода: от 20 л/ч до 1000 л/ч
- Цена наименьшего деления: 0,02 л
- Предел измерения стрелочного механизма (1 оборот): 5 л
- Максимально допустимый перепад давления: 600 мм вод. ст. (5885 Па)

• Спиртовой микроманометр ММН-2400 Устройство

1. Сосуд с рабочей жидкостью
 2. Измерительная шкала
 3. Стойка для регулировки наклона К
 4. Место крепления измерительных трубок («-» и «+»)
 5. Переключатель режима работы (металлический рычажок): (0) — установка нуля; (+) — проведение измерений.
 6. Поплавок регулировки уровня спирта (для установки нуля)
 7. Винт, регулирующий глубину погружения поплавка
 8. Индикаторы горизонтального уровня
 9. Регулируемые ножки
- Класс точности: 1,0
 - Рабочая жидкость: спирт этиловый ректификованный 96(плотность $0,8095 \pm 0,0005$ г/см³ при 20°C)

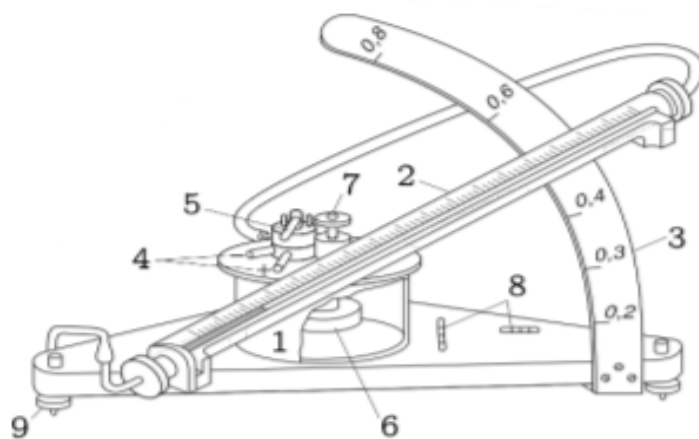


Рис. 2: Схема микроманометра

Экспериментальная установка

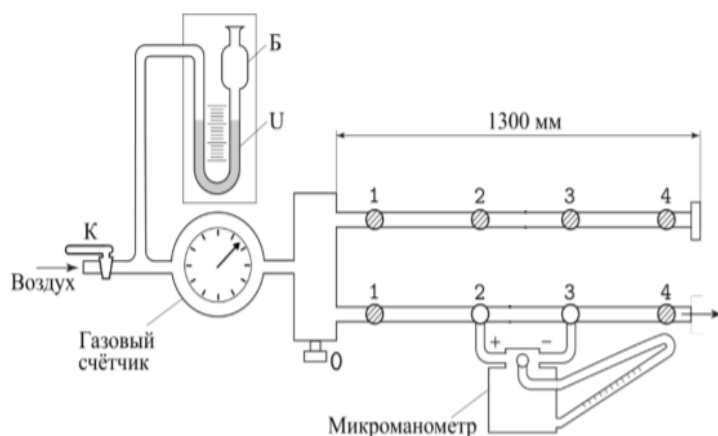


Рис. 3: Схема экспериментальной установки

Поток воздуха под давлением, превышающим атмосферное, поступает через газовый счётчик в тонкие металлические трубки под действием компрессора, интенсивность 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 рабочей трубе, микроманометр подключен к ее двум выводам, а остальные отверстия плотно закрыты.

Перед входом установлен водяной U-образный манометр. При превышении максимального избыточного давления на входе счётчика (30 см.вод.ст) вода выплескивается в баллон Б.

Теоретические сведения

η - вязкость среды

Q - объемный расход газа; Q зависит от перепада давления ΔP , плотности ρ и вязкости η газа, от радиуса трубы R и её длины l (исследуемой части)

Характер течения в трубе может быть ламинарным либо турбулентным. При ламинарном течении линии тока не смешиваются, скорости вдоль них одинаковы. При турбулентном образуются вихри, перемешиваются слои течения газа, линии тока; постоянной является только средняя скорость течения газа.

Характер течения определяется числом Рейнольдса:

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

ρ - плотность среды, u - характерная скорость потока, a - характерный размер системы (для тонкой трубы - радиус R). С ростом Re может быть достигнуто число $Re_{кр}$, при котором характер течения нельзя считать ламинарным.

В условиях данной работы используются следующие данные и приближения: $Re_{кр} \approx 10^3$, $\eta \approx 2 \cdot 10^{-5}$ газ несжимаемый ($\rho = \text{const}$), перепад давления мал, а число Маха значительно меньше 1

При ламинарном течении объёмный расход газа описывается формулой Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8l\eta} \Delta P \quad (2)$$

ΔP - разность давлений в выбранных сечениях, расстояние между которыми равно l . Необходимо отметить, что формула(1) работает при $Re < 1000$, т.е. течение ламинарно с запасом. Для

выполнения формулы (2) необходимо, чтобы удельный объём газа существенно не изменялся, т.е. перепад давления должен быть малым по сравнению с внешним (атмосферным) давлением.

Необходимо также отметить, что стационарное течение устанавливается не сразу, а на какой-то определенной длине, которое приблизительно можно посчитать по формуле

$$l_{\text{уст}} = 0.2 * R * Re \quad (3)$$

0.2 - экспериментально установленное значение, справедливое для данной работы. Если $l_{\text{уст}} < l$, то течение нельзя считать установившимся, а значит и ламинарным.

Рассмотрим турбулентное течение газа в тонкой трубке. В простейшей модели: предположим, что при больших значениях Re ($Re \gg Re_{\text{кр}}$) можно считать практически идеальной, так что параметры её течения не зависят от коэффициента вязкости. Отсюда получаем:

$$Q = const * R^{5/2} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho l}} \quad (4)$$

Результаты измерений и обработка данных

1) Согласно паспорту приборов (газового счётчика и микроманометра) их погрешности составляют $\Delta V = 0,2 \text{ л} = 0,2 \text{ дм}^3$ для счётчика и 1 деление для микроманометра (конкретное значение давления зависит от набора данных)

2) Проверим работоспособность установки, наблюдаем качественно изменения показаний газового счётчика и микроманометра при изменении степени открытия крана.

3) $T_{\text{ср}} = 22,6 \pm 0,1^\circ \text{C}$ - температура окружающей среды

$\mu = 0,92$ - влажность воздуха

$p_a = 10^5 \text{ Па}$ - атмосферное давление

Запишем диаметры трубок:

$d_1 = 3,95 \pm 0,05 \text{ мм}$

$d_2 = 3,00 \pm 0,01 \text{ мм}$

$d_3 = 5,30 \pm 0,05 \text{ мм}$

Тогда значение плотности воздуха можно считать приблизительно равным: $\rho = 1,18 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

4) Отметим, что Q связана с u - характерной скоростью потока - следующим соотношением: $Q = \pi R^2 u$. Тогда из (1) получим, что:

$$Q_{\text{кр}} = \frac{Re_{\text{кр}} \eta \pi R}{\rho} \quad (5)$$

Теперь по формуле Пуазейля (2) возможно рассчитать $\Delta P_{\text{кр}}$

№ трубки	$Q_{\text{кр}}, \frac{\text{дм}^3}{\text{с}}$	$l, \text{ м}$	$\Delta P, \text{ Па}$	$l_{\text{уст}}, \text{ м}$
1	0,105	0,9	316,8	0,395
2	0,080	0,415	333,5	0,3
3	0,141	0,9	131,1	0,53

Таким образом, можно сделать вывод, что каждой из трёх длин достаточно для того, чтобы считать течение на этих участках установившимся

5) Пронаблюдаем за изменением перепада давления с изменением положения крана. Заметим (приблизительно) переход с ламинарного на турбулентное течение.

Для первой трубки искомое давление составило 292,20 Па; для второй - 319,47 Па; для третьей - 138,31 Па

Таким образом, можно сказать, что теоретические данные совпадают с полученными на практике

$$6) Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \Rightarrow \varepsilon_Q = \frac{\sigma_V}{\Delta V} + \frac{\sigma_t}{\Delta t}$$

Таким образом, относительная погрешность измерения расхода складывается из относительных погрешностей времени и объёма. Для необходимой оценки условимся, что каждая из них не должна превышать значения 0,5%. Тогда:

$$V_{\text{min}} = \frac{\sigma_V}{0,005} = 4 \text{ л}, \quad t_{\text{min}} = \frac{\sigma_t}{0,005} = 80 \text{ с}$$

Отметим также, что т.к. некоторые измерения занимают довольно продолжительное время, в них без потери точности можно использовать меньший временной промежуток.

7)Измерения на 1 трубке

N, дел	$\Delta V, \text{дм}^3$	$\Delta t, \text{с}$	$Q, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	$\Delta P, \text{Па}$	$\frac{\Delta P}{l}, \frac{\text{Па}}{\text{м}}$
8	3.00	251.5	1.19	31.17	34.63
15	2.50	118.7	2.11	58.44	64.93
20	3.00	107.3	2.80	77.92	86.58
30	4.00	101.0	3.96	116.88	129.86
38	5.00	97.7	5.12	148.05	164.50
45	5.00	82.5	6.06	175.32	194.80
54	5.00	69.9	7.15	210.38	233.76
60	5.00	62.3	8.03	233.76	259.73
68	5.00	56.3	8.89	264.93	294.37
75	5.00	52.3	9.56	292.20	324.67
84	5.00	49.5	10.1	327.26	363.62
95	5.00	47.7	10.5	370.12	411.24
106	5.00	46.5	10.8	412.98	458.87
120	5.00	44.9	11.1	467.52	519.47
142	5.00	42.4	11.8	553.23	614.70

$\Delta P = 9.8067 * 0.9932 * K * N$, где 9,8067 - ускорение свободного падения - и 0,9932 - коэффициент, зависящий от условий окружающей среды - коэффициенты перевода показаний на шкале манометра в давление

K=0.4 - коэффициент чувствительности микроманометра

Аналогично проведем эксперимент на 2 и 3 трубках и занесем значения в таблицы (K=0.8 и 0.2 соответственно)

N, дел	V, дм ³	$\Delta t, \text{с}$	$Q, \frac{\text{м}^3}{\text{с}} * 10^{-5}$	$\Delta P, \text{Па}$	$\frac{\Delta P}{l}$
7	3.0	129.5	2.32	54.54	131.42
14	3.0	65.9	4.55	109.09	262.87
20	5.0	83.8	5.97	155.84	375.52
25	5.0	72.9	6.86	194.80	469.40
30	5.0	64.4	7.76	233.76	563.28
34	5.0	60.0	8.33	264.93	638.39
41	5.0	54.5	9.17	319.47	769.81
44	5.0	53.4	9.36	342.85	826.14

N, дел	V, дм ³	Δt , с	$Q, \frac{м^3}{с} * 10^{-5}$	ΔP , Па	$\frac{\Delta P}{l}, \frac{Па}{м}$
16	4,0	96,1	4,16	31,17	34,63
20	5,0	49,8	10,04	38,96	43,29
28	5,0	72,7	6,88	54,54	60,60
37	5,0	57,4	8,71	72,08	80,09
46	5,0	46,5	10,75	89,61	99,57
58	5,0	39,2	12,76	112,98	125,53
71	5,0	34,9	14,33	138,31	153,68
80	4,0	27,0	14,81	155,84	173,16
93	4,0	26,2	15,27	181,16	201,29
104	4,0	25,6	15,63	202,59	225,10
117	5,0	30,5	16,39	227,92	253,24
129	5,0	29,3	17,06	251,29	279,21
144	5,0	28,3	17,67	280,51	311,68

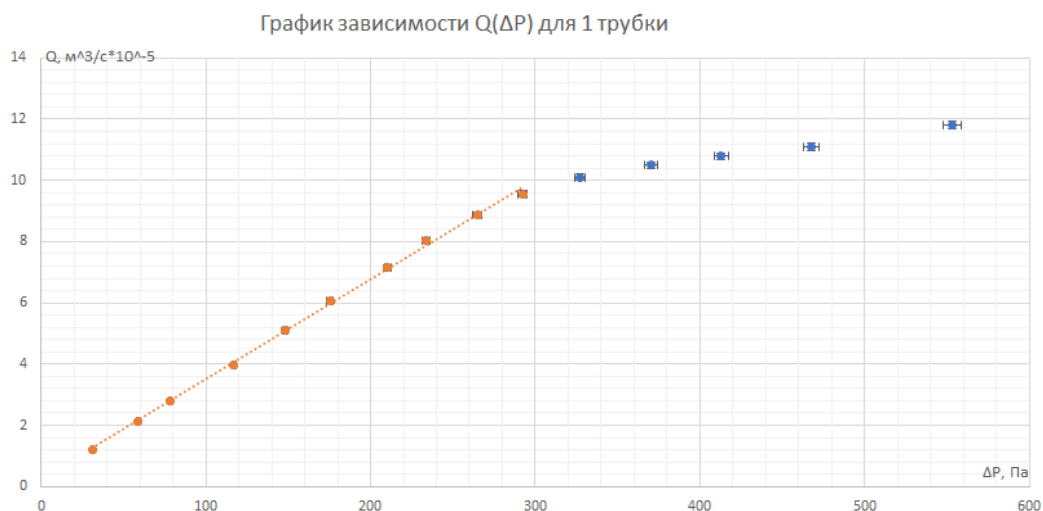
8)

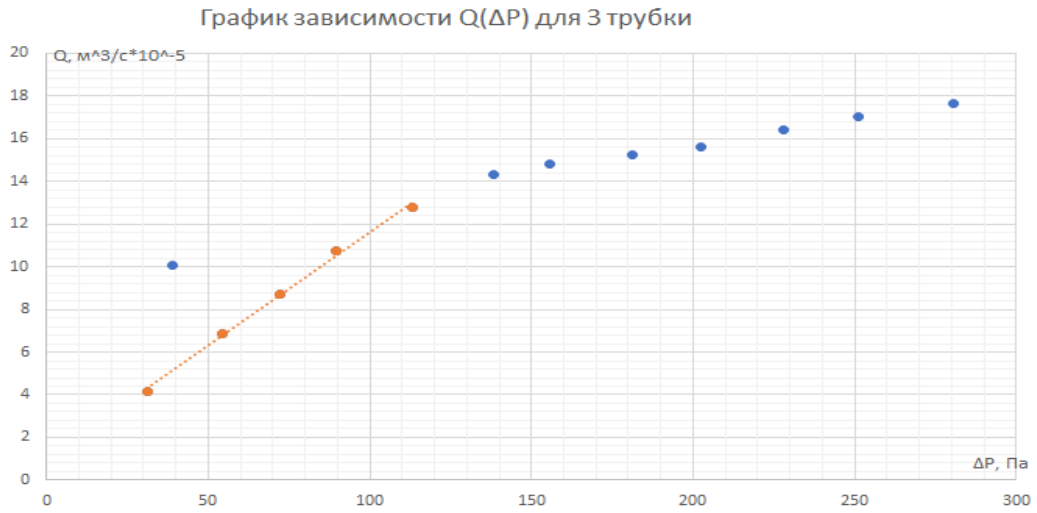
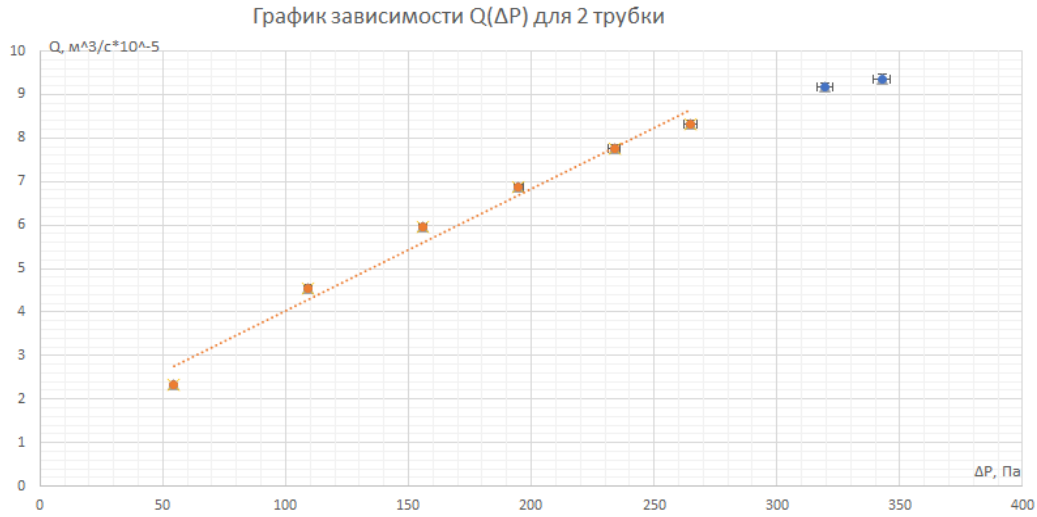
1 трубка										
l, м	0,112	0,412	0,812	1,312	0,300	0,700	1,200	0,400	0,900	0,500
N, дел	63	114	132	259	53	124	197	72	145	75
ΔP , Па	122,72	222,07	257,14	504,53	103,24	241,55	383,76	140,26	282,46	146,10
2 трубка										
l, м	0,115	0,415	0,615	0,20	0,500	0,300	-	-	-	-
N, дел	62	64	145	38	82	33	-	-	-	-
ΔP , Па	120,78	124,67	282,46	74,02	159,74	64,28	-	-	-	-
3 трубка										
l, м	0,115	0,415	0,815	1,315	0,300	0,700	1,200	0,400	0,900	0,500
N, дел	24	40	59	81	18	37	57	20	44	24
ΔP , Па	46,75	77,92	114,93	157,79	35,06	72,08	111,04	38,96	85,71	46,75

При расчёте ΔP $K=0.2$

10) Согласно полученным экспериментальным точкам, ламинарность потока на всех трубках обеспечивается при значении градиента давления $\frac{\Delta P}{l} = 125 \frac{Па}{м}$. Максимальный достижимый градиент давления, обеспечивающий турбулентность течения равен $857 \frac{Па}{м}$. Соответственные значения расхода газа: $3,75 * 10^{-5}$, $1,44 * 10^{-5}$ и $12.77 * 10^{-5} \frac{м^3}{с}$ для ламинарного течения; $15.89 * 10^{-5}$, $9.36 * 10^{-5}$ и $32.59 * 10^{-5} \frac{м^3}{с}$ - для турбулентного

11) Построим графики зависимостей $Q(\Delta P)$





Оранжевым цветом выделены точки, для которых течение газа можно считать ламинарным.

Таким образом, $\Delta P_{\text{кр}}$ можно считать равным (310 ± 20) Па для первой трубки, (290 ± 30) Па - для второй и (125 ± 15) Па - для третьей, что подтверждается теоретическими расчётами. Соответственные им $Q_{\text{кр}}$ равны $(9.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$, $(8.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ и $(13.5 \pm 0.8) \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$

Определим угловые коэффициенты для линейных участков наших графиков.

$$\alpha = \frac{\langle Q \Delta P \rangle - \langle Q \rangle \langle \Delta P \rangle}{\langle Q^2 \rangle - \langle Q \rangle^2} \quad \sigma_\alpha = \sqrt{\frac{1}{N-2} \left(\frac{\langle Q^2 \rangle - \langle Q \rangle^2}{\langle \Delta P^2 \rangle - \langle \Delta P \rangle^2} - \alpha^2 \right)}$$

$$\alpha_1 = 3.27 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^3}{\text{Па} \cdot \text{с}} \quad \sigma_{\alpha_1} = 0.04 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^3}{\text{Па} \cdot \text{с}}$$

$$\alpha_2 = 2.8 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^3}{\text{Па} \cdot \text{с}} \quad \sigma_{\alpha_2} = 0.2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^3}{\text{Па} \cdot \text{с}}$$

$$\alpha_3 = 1.06 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{Па} \cdot \text{с}} \quad \sigma_{\alpha_2} = 0.05 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{Па} \cdot \text{с}}$$

$$\alpha = \frac{\pi R^4}{8l\eta} \Rightarrow \eta = \frac{\pi R^4}{8l\alpha}$$

$$\sigma_\eta = \sqrt{(\sigma_\eta^{\text{случ}})^2 + (\sigma_\eta^{\text{приб}})^2}$$

$$\sigma_\eta^{\text{приб}} = \eta \left(\frac{\sigma_R}{R} + \frac{\sigma_l}{l} \right) \quad \sigma_\eta^{\text{случ}} = \eta \frac{\sigma_\alpha}{\alpha}$$

$$\eta_1 = 2.0 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \quad \sigma_{\eta_1} = 0.1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$$

$$\eta_2 = 1.7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \quad \sigma_{\eta_2} = 0.1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$$

$$\eta_3 = 2.0 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \quad \sigma_{\eta_3} = 0.1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$$

Из формулы (5) выразим значение $Re_{\text{кр}}$: $Re_{\text{кр}} = \frac{Q_{\text{кр}} \rho}{\eta \pi R}$

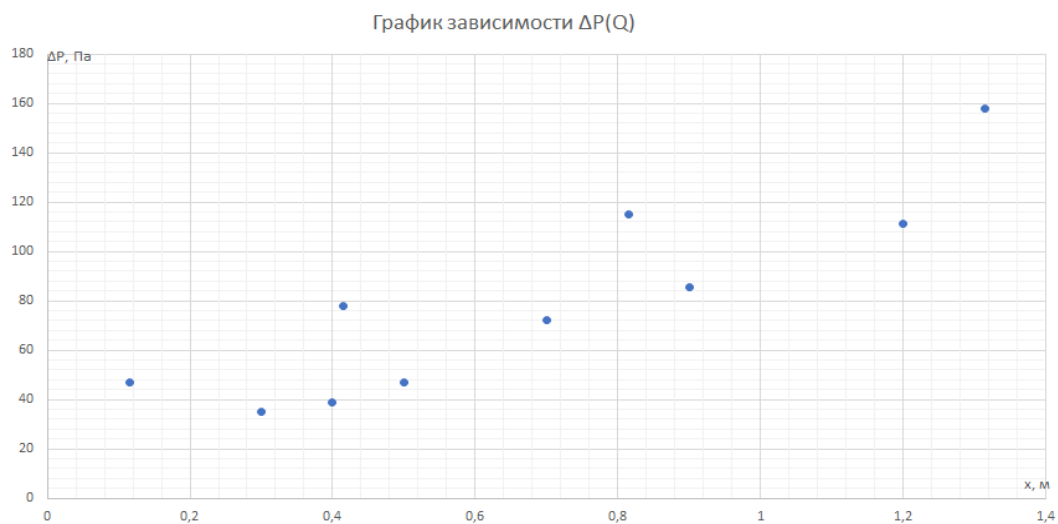
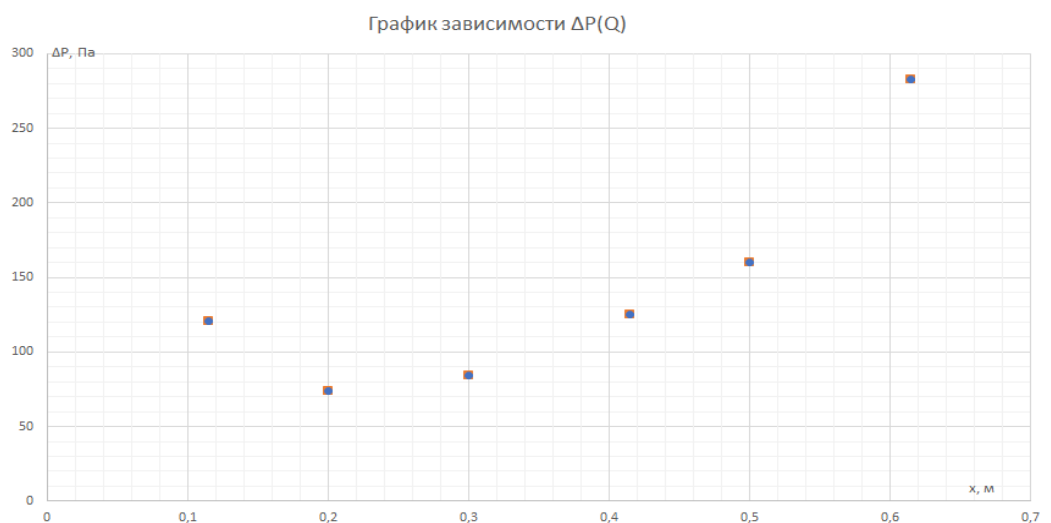
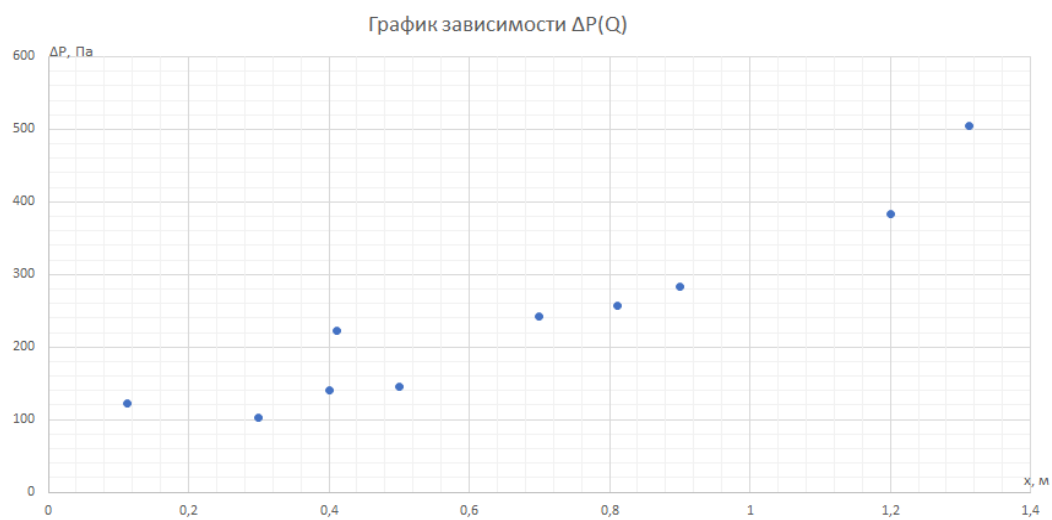
$$\sigma_{Re} = Re \left(\frac{\sigma_{Q_{\text{кр}}}}{Q_{\text{кр}}} + \frac{\sigma_\eta}{\eta} + \frac{\sigma_R}{R} \right)$$

$$(Re_{кр})_1 = (930 \pm 90)$$

$$(Re_{кр})_2 = (1300 \pm 140)$$

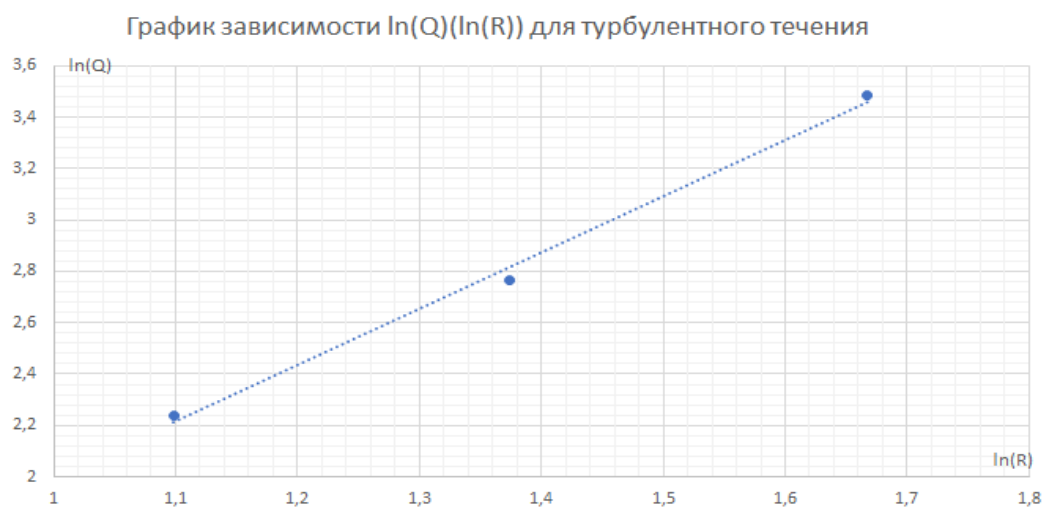
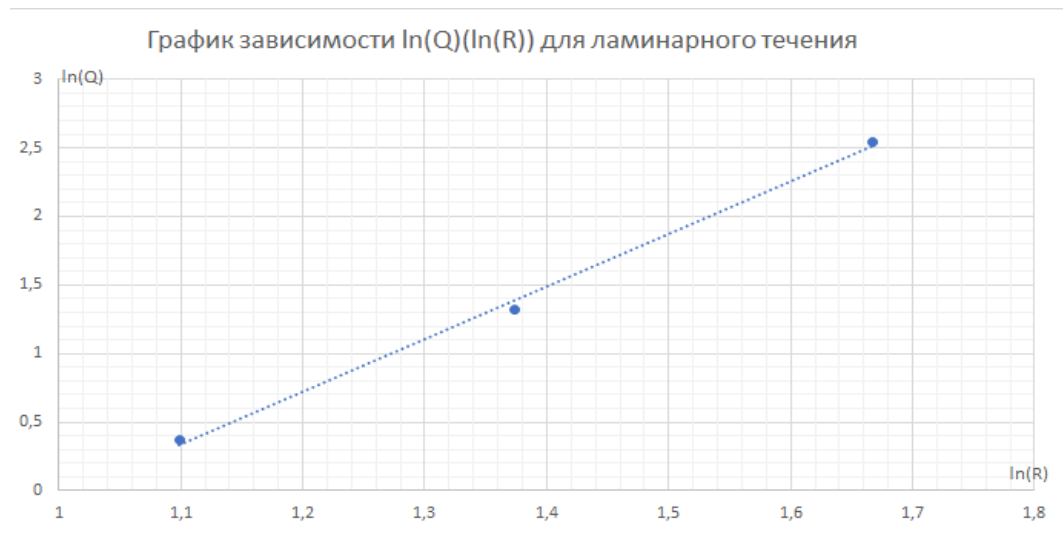
$$(Re_{кр})_3 = (960 \pm 110)$$

12) Построим графики зависимости $\Delta P(x)$



Из графиков можно сделать вывод, что установившееся движение можно считать приблизительно на 0,3м, 0,2м и 0,3м, что заметно меньше, чем расчетные показатели.

13) По точкам, полученным в п.10 построим графики $\ln(Q)(\ln(R))$



Посчитав коэффициенты наших графиков, получим значения угловых коэффициентов 3,84 и 2,20. Таким образом, можно считать подтвержденной теоретическую модель, описывающую исследуемую зависимость.

Обсуждение результатов и выводы

В ходе работы был исследован ряд зависимостей величин, характеризующих течение газа в тонкой трубе круглого сечения как друг от друга, так и от различных параметров трубки. При анализе полученных экспериментальных данных было установлено, что формула Пуазейля действительно справедлива в реальных условиях, проверены и доказаны характеры зависимостей объёмного расхода газа (Q) от радиуса трубок (R). Доказано, что действительно существует ламинарное и турбулентные течения и замечен переходный период, когда движение уже точно не является ламинарным, но и однозначно не определяется как турбулентное.

При анализе результатов были получены значения вязкости воздуха и чисел Рейнольдса для каждой из трёх исследуемых трубок. Установлено, что вязкость действительно не зависит от радиуса тонкой трубы круглого сечения и равна $(2,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$, что совпадает с табличными при наших условиях (1,9).

С хорошей точностью (не более 6%) были получены значения для вязкости газа. Наибольший вклад внесла случайная погрешность, что говорит о необходимости увеличения количества измерений с целью ее уменьшения, а также, желательно, увеличения точности приборов. Из-за несовершенства измерительных приборов из анализа были вынужденно исключены значения, полученные со второй трубки, т.к. невозможно получить данные выше определенного предела, а также достаточно высокой погрешности измерений. Не возможно достоверно оценить погрешность полученного числа Рейнольдса, т.к. необходимые значения были получены "на глаз" из графика, что говорит о необходимости увеличения количества измерений и точности измерительных приборов, чтобы была возможность точно установить момент смены характера течения.