

Лабораторная работа 1.3.3

Определение вязкости воздуха по скорости течения через тонкие трубки

Рашковецкий М.М., группа 526т

26 апреля 2016 г.

Цель работы: экспериментально выявить участок сформированного течения, определить режимы ламинарного и турбулентного течения; определить число Рейнольдса.

Оборудование и материалы: металлические трубки, укрепленные на горизонтальной подставке; газовый счётчик; микроанометр типа ММН; стеклянная U-образная трубка; секундомер.

Краткая теория

При малых скоростях течение жидкости является ламинарным (слоистым; скорости частиц направлены по оси трубки), при больших — турбулентным (слои перемешиваются, скорости частиц в каждой точке быстро меняются и сохраняется только средняя). Критерием, позволяющим определить тип течения, является число Рейнольдса:

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

где v — скорость потока, r — радиус трубки, ρ — плотность движущейся среды, η — её вязкость. В гладких трубах круглого сечения переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при $\text{Re} \approx 1000$.

При ламинарном течении расход определяется формулой Пуазейля:

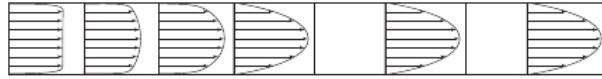
$$Q = \frac{\pi r^4 (P_1 - P_2)}{8l\eta}, \quad (2)$$

где $P_{1,2}$ — давления в двух выбранных сечениях, l — расстояние между ними.

Условия применимости формулы (2):

1. с запасом выполняется $\text{Re} < 1000$;
2. не происходит заметного изменения плотности газа;
3. закон распределения скоростей по течению на участке 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 сечению (рис. 1), но затем крайние слои тормозятся за счёт стенок трубы и характерное для ламинарного течения параболическое распределение скоростей формируется на расстоянии

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

от начала трубки.

Экспериментальная установка

Рис. 2: Схема установки

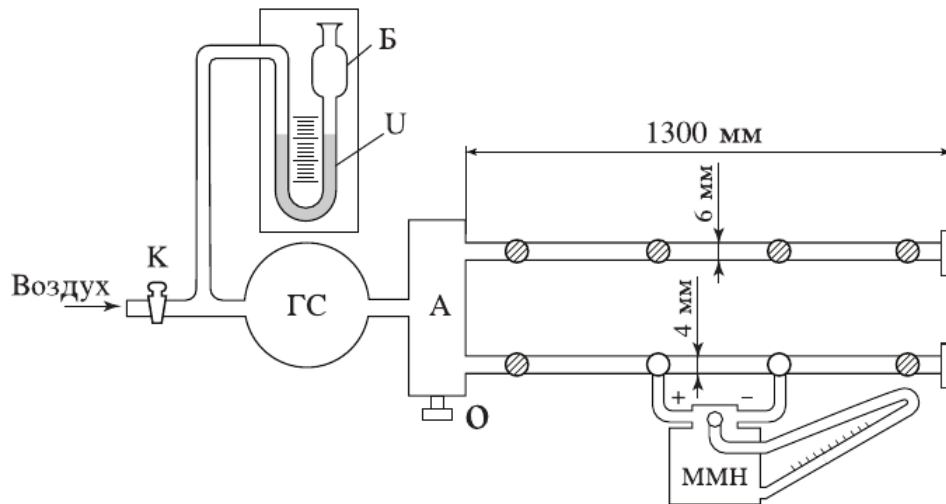


Схема установки приведена на рис. 2, где:

К кран для подачи воздуха и регулирования давления;

ММН микрометрический манометр;

ГС газовый счётчик;

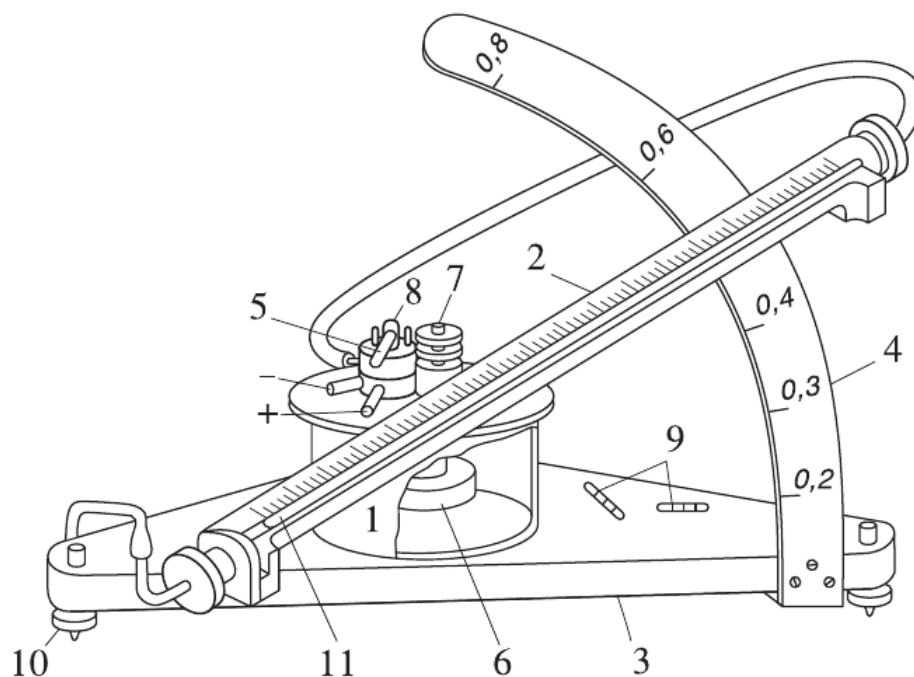
А резервуар, к которому припаяны металлические трубки;

U U-образная трубка для измерения давления и предохранения газового счётчика (при слишком большом давлении начинает бурлить, привлекая внимание).

Б защитный баллон, куда выплёскивается вода при слишком больших перепадах давления.

Для измерения давления в трубках просверлены миллиметровые отверстия, к двум при-
крепляется микроманометр, а другие закрываются пробками.

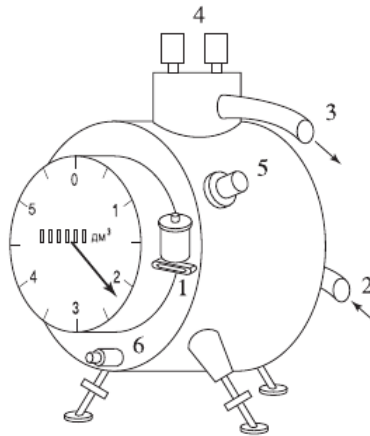
Рис. 3: Микрометрический манометр типа ММН



Микроманометр типа ММН (рис. 3) может измерять перепад давления до 200 мм рт.ст. Он состоит из:

1. цилиндра со спиртом;
2. трубки со шкалой;
3. подставки;
4. стойки с указанными множителями;
5. рычажка для перевода из режима «0» (установка на ноль) в режим «+» (измерения);
6. цилиндр для регулировки нуля;
7. винта для регулировки глубины погружения цилиндра;
8. трёхходового крана;
9. уровни;
10. регулировочные ножки для установки в горизонтальное положение;

Рис. 4: Внешний вид газового счётчика

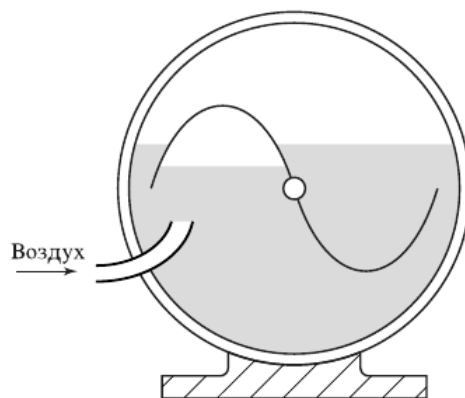


11. мениска, по которому снимаются показания;

Внешний вид газового счётчика показан на рис. 4, где цифрами отмечены:

1. водомерное устройство;
2. трубка для входа газа;
3. трубка для выхода газа;
4. патрубки для присоединения U-образного манометра;
5. патрубков для установки термометра;
6. кран для слива воды;

Рис. 5: Устройство газового счётчика



Принцип работы счётчика пояснён на рис. 5. На оси вдоль осевой линии цилиндра прикреплёны лёгкие чаши. В чашу, находящуюся над трубкой 2, поступает воздух. Когда чаша наполняется воздухом, она всплывает и её место занимает следующая. Обороты оси считаются специальным устройством.

Ход работы

1. Подготовили установку к работе: установили приборы по уровням, проверили наличие воды в газовом счётчике, установили на нуль мениск микроманометра.
2. Подсоединили микроманометр к последним выводам трубки ($d = (3,90 \pm 0,05)$ мм) на участке со сформировавшимся потоком (к последним двум отверстиям, т.к. согласно (3) $a \approx 40$ см, расстояние между ними $l = 50$ см), открыли эту трубку.
3. Медленно открывая кран К и впуская воздух в установку, внимательно следили за показаниями манометра.
4. Сняли зависимость ΔP от $Q = \Delta V / \Delta t$, где ΔV измеряли газовым счётчиком, а Δt — секундомером, во всём доступном диапазоне перепадов давлений.
5. При расходе, обеспечивающем ламинарность течения, измерили распределение давления вдоль трубки, измерив перепад давлений по всем парам отверстий.

Обработка результатов

В таблице 1 приведены результаты измерений зависимости ΔP от Q .

Давление посчитано по формуле

$$\Delta P = K \rho g \Delta h.$$

Погрешности оценены из таких соображений: $\sigma_{\Delta h} = 0,05$ см $\Rightarrow \sigma_{\Delta P} = K \rho \sigma_{\Delta h}$; объём фиксировался по делениям, поэтому его измерение считаем точным, а вот $\sigma_{\Delta t} = 0,5$ с, поэтому $\sigma_Q = Q \frac{\sigma_{\Delta t}}{\Delta t}$.

По этим данным был построен график (рис. 6). Видно, что первые 6 точек хорошо ложатся на прямую, а дальше график начинает заметно отклоняться от прямолинейного. Эти 6 точек были аппроксимированы прямой по МНК с учётом весов точек по формуле

$$Q = k \Delta P.$$

Эта прямая также нанесена на график.

Согласно (2), вязкость через угловой коэффициент выражается как

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8 l k}. \quad (4)$$

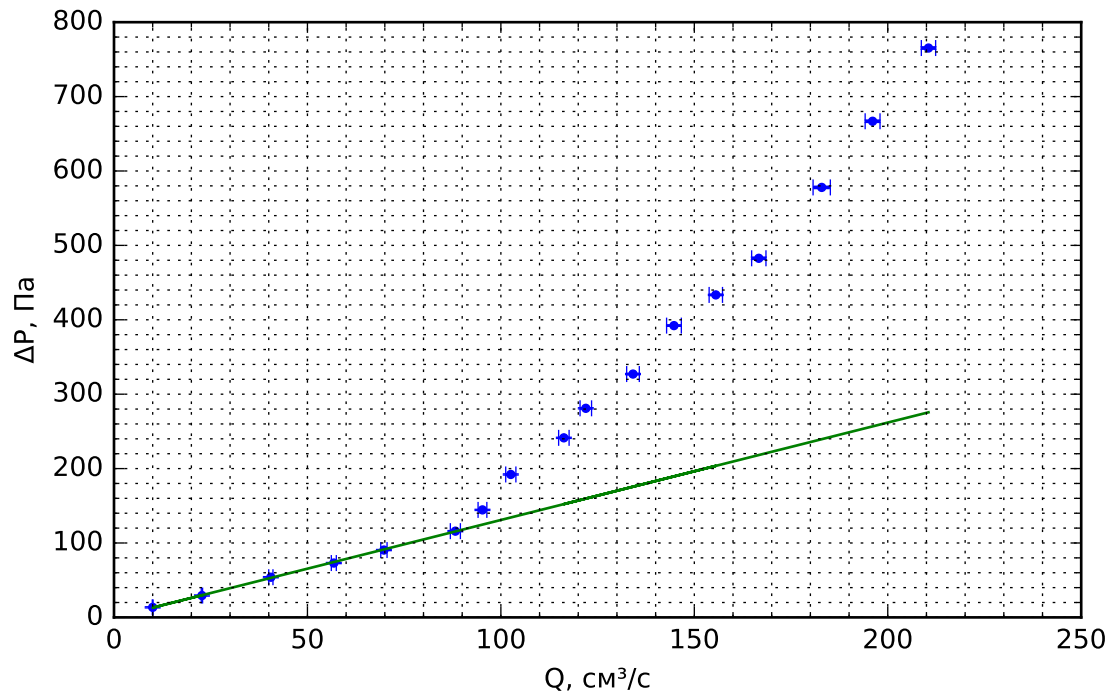
Соответственно, погрешность равна

$$\sigma_\eta = \eta \sqrt{\left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2 + \left(4 \frac{\sigma_r}{r}\right)^2}$$

Таблица 1: Результаты измерений ΔP от Q

Δh , см	K	ΔV , л	Δt , с	ΔP , Па	Q , см ³ /с
1,85	0,2	1,5	66	$29,4 \pm 0,8$	$22,7 \pm 0,2$
0,85	0,2	0,5	50	$13,5 \pm 0,8$	$10,0 \pm 0,1$
3,4	0,2	1,5	37	$54,0 \pm 0,8$	$40,5 \pm 0,5$
4,6	0,2	2,5	44	$73,0 \pm 0,8$	$56,8 \pm 0,6$
5,7	0,2	3	43	$90,5 \pm 0,8$	$69,8 \pm 0,8$
7,3	0,2	3	34	$115,9 \pm 0,8$	$88,2 \pm 1,3$
9,1	0,2	4	42	$144,5 \pm 0,8$	$95,2 \pm 1,1$
12,1	0,2	4	39	$192,1 \pm 0,8$	$102,6 \pm 1,3$
17,7	0,2	5	41	$281,0 \pm 0,8$	$122,0 \pm 1,5$
24,7	0,2	5,5	38	$392,2 \pm 0,8$	$144,7 \pm 1,9$
27,3	0,2	7	45	$433,4 \pm 0,8$	$155,6 \pm 1,7$
20,6	0,2	5,5	41	$327,1 \pm 0,8$	$134,1 \pm 1,6$
15,2	0,2	5	43	$241,3 \pm 0,8$	$116,3 \pm 1,4$
15,2	0,4	7,5	45	$482,7 \pm 1,6$	$166,7 \pm 1,9$
18,2	0,4	7,5	41	$577,9 \pm 1,6$	183 ± 2
21,0	0,4	10	51	$666,8 \pm 1,6$	$196,1 \pm 1,9$
24,1	0,4	12	57	$765,3 \pm 1,6$	$210,5 \pm 1,8$

Рис. 6: График зависимости перепада давлений от расхода



Получены результаты:

$$k = (7,64 \pm 0,06) \cdot 10^{-7} \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}^3},$$

$$\eta = (14,9 \pm 0,8) \text{ мкПа} \cdot \text{с}.$$

В справочнике (Енохович А.С. Краткий справочник по физике. М., «Высш. школа», 1976) приведена вязкость воздуха при температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$ $\eta_1 = 18,1 \text{ мкПа} \cdot \text{с}$, а при $t_2 = 100^\circ\text{C}$ — $\eta_2 = 21,2 \text{ мкПа} \cdot \text{с}$. Наш результат получился заниженным значительно больше погрешности, возможно, это объясняется некоторыми отличиями в составе воздуха, например, большей влажностью (водяной пар имеет меньшую вязкость в этом диапазоне температур).

Переходной областью от ламинарного к турбулентному течению условно можно считать 7–11 точки, для них числа Рейнольдса

$$\text{Re}_7 \approx 1350,$$

$$\text{Re}_{11} \approx 1900,$$

принимая $\rho \approx 1,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Переход наблюдается даже несколько позже, чем предсказывала теория.

Затем около третьей точки (по расходу, $\text{Re}_3 \approx 500$) приведены разности давлений между всеми парами доступных отверстий (таблица 2). Они аддитивны в пределах погрешности ($\sigma_{\Delta h} = 0,05 \text{ см}$). Расстояния между соседними отверстиями: $l_{01} = 11,5 \text{ см}$, $l_{12} = 30 \text{ см}$, $l_{23} = 40 \text{ см}$, $l_{34} = 50 \text{ см}$.

Таблица 2: Разность давлений для пар отверстий

Δh_{ij} , см	0	1	2	3	4
0	–	3,7	10,2	14,7	20,1
1	3,7	–	6,5	11,0	16,5
2	10,2	6,5	–	4,5	10,0
3	14,7	11,0	4,5	–	5,5
4	20,1	16,5	10,0	5,5	–

По этим данным был построен график $\Delta h_{i4}(l_{i4})$ (рис. 7).

Поскольку точек мало, судить о линейности и соответственно ламинарности достаточно сложно, но первые (от нуля) три точки почти ложатся на прямую, т.е. формирование потока завершается около второго отверстия и экспериментальное значение $a^* \approx 40 \text{ см}$, как и предсказано по (3).

Рис. 7: График зависимости перепада давлений от расстояния

