

### Работа 1.3.3

## Определение вязкости воздуха по скорости течения через тонкие трубки

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

**В работе используются:** металлические трубки, укрепленные на горизонтальной подставке; газовый счетчик; микроманометр типа ММН; стеклянная U-образная трубка; секундомер.

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:

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

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

При ламинарном течении объем газа  $V$ , протекающий за время  $t$  по трубе длиной  $l$ , определяется формулой Пуазейля (3.23):

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

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 (2) позволяет определять вязкость газа по его расходу.

Отметим условия, при которых справедлива формула (2). Прежде всего необходимо, чтобы с достаточным запасом выполнялось неравенство  $\text{Re} < 1000$ . 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 (2) выводится для участков трубки, на которых закон распределения скоростей газа по сечению не меняется при движении вдоль потока.

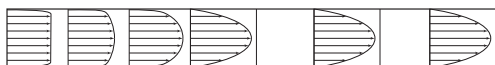


Рис. 1. Формирование потока газа в трубе круглого сечения

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

$$a \approx 0,2r \cdot \text{Re}. \quad (3)$$

Градиент давления на участке формирования потока оказывается большим, чем на участке с установившимся ламинарным течением, что позволяет разделить эти участки экспериментально. Формула (3) дает возможность оценить длину участка формирования.

**Экспериментальная установка.** Измерения производятся на экспериментальной установке, схема которой изображена на рис. 2. Поток воздуха под давлением, несколько превышающим атмосферное (на 5–7 см вод. ст.), через газовый счетчик ГС поступает в резервуар А, к которому припаяны тонкие металлические трубки. Примерные размеры трубок указаны на рисунке (точные размеры обозначены на установке). Обе трубки на концах снабжены заглушками, не пропускающими воздух. Во время измерений заглушка открывается только на рабочей трубке; конец другой трубки должен быть плотно закрыт.

Перед входом в газосчетчик поставлена U-образная трубка, наполовину заполненная водой. Она выполняет две задачи. Первая — измерение давления газа на входе в газосчетчик. Вторая — предохранение газосчетчика от выхода из строя. Дело в том, что газосчетчик устойчиво работает, если давление газа на его входе не превышает 600 мм водяного столба. Высота U-образной трубки примерно 600 мм, поэтому,

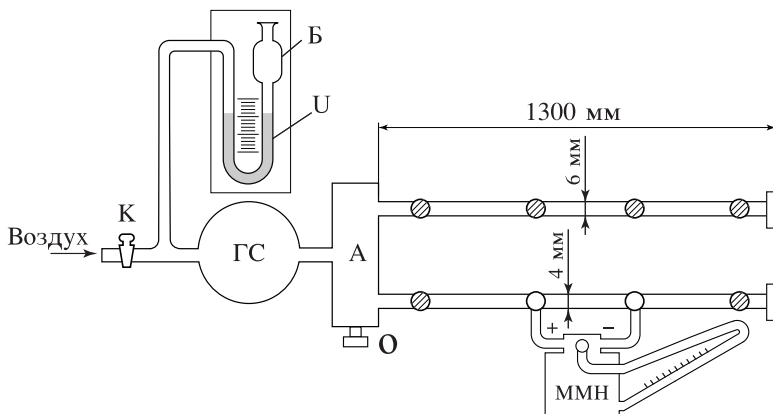


Рис. 2. Схема установки для определения вязкости воздуха

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 завинчивающимися 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, 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 ноль шкалы производится путем изменения уровня спирта в сосуде 1 с помощью цилиндра 6. Глубина погружения цилиндра в спирт регулируется винтом 7.

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

На крышке прибора установлен трехходовой кран 8, который имеет два рабочих положения — «0» и «+» (рис. 3). В положении «0» мениск жидкости устанавливается на ноль. В положении «+» произ-

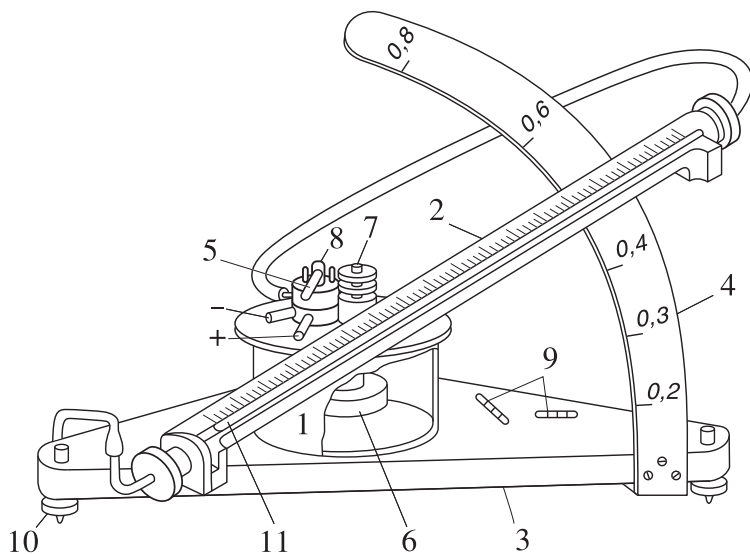


Рис. 3. Микрометрический манометр типа ММН

водятся рабочие измерения. Перевод из положения «0» в положение «+» и наоборот осуществляется с помощью рычажка 5 (рис. 3). При этом учитывается, что в резервуаре уровень жидкости практически не меняется.

*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 водомерному 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,

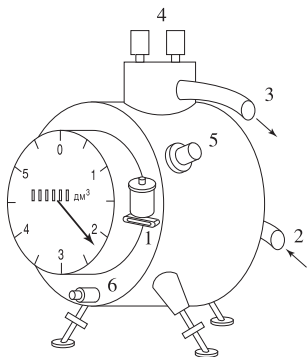


Рис. 4. Внешний вид  
газового счетчика

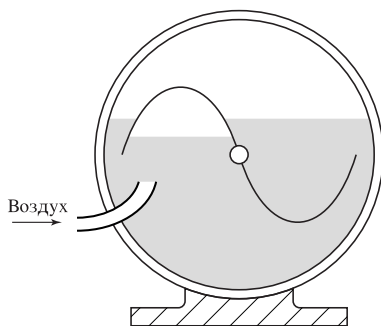


Рис. 5. Схема устройства газового  
счетчика

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.

### ЗАДАНИЕ

1. Подготовьте установку к работе: установите приборы по уровням, проверьте наличие воды в газовом счетчике по водомерному устройству, установите на нуль мениск микроманометра. Полный объем измерения проведите на одной из трубок (лучше на трубке  $d = 4$  мм).
2. По формуле (3) оцените расстояние, на котором происходит формирование потока при ламинарном течении. Расчет проведите для  $Re = 1000$ .
3. Подсоедините микроманометр к двум соседним выводам выбранной трубки на участке со сформировавшимся потоком. Отвинтите пробку на конце этой трубки; все остальные выводы на трубках должны быть плотно завинчены пробками, снабженными резиновыми прокладками.
4. Медленно открывая кран К (рис. 2) и впуская воздух в установку, внимательно следите за показаниями микроманометра. При больших перепадах давления спирт может вылиться из микроманометра через трубку 11.

Чаще всего это нежелательное явление происходит при измерениях на тонких трубках. Спирт заливает не только резиновую трубку, соединяющую манометрическую трубку 11 с трёхходовым краном, но может попасть и в трубку, соединённую с (-). В резиновых соединительных трубках остаются капли жидкости, которые приводят к тому, что  $\Delta P = P_1 - P_2$  измеряется неправильно. Поэтому перед измерениями (и

после того, как спирт попадает в трубки) необходимо убедиться в том, что капелек в соединительных трубках нет. Их присутствие можно обнаружить по резким скачкам столбика в манометрической трубке 11, происходящим при осторожном перемещении соединительных трубок. В этом случае трубки надо снять и просушить.

5. Измерьте вязкость воздуха. Для этого снимите зависимость разности давлений  $\Delta P$  от расхода воздуха  $Q = \Delta V / \Delta t$ , при этом  $\Delta V$  измеряется газовым счетчиком, а  $\Delta t$  — секундомером. Установите множитель на стойке 4 равным 0,2. Начинать надо с малых перепадов давлений (2–3 мм вод. ст.), постепенно увеличивая расход  $Q$ . В диапазоне от 0 до 100 дел. по шкале 2 (рис. 3) должно быть не менее 5–6 точек замера. Это необходимо для того, чтобы заведомо попасть в режим ламинарного течения. После этого замеры можно проводить реже, но в более широком диапазоне по давлению, чтобы попасть в турбулентный режим. По полученным данным постройте график  $\Delta P = f(Q)$ . Из формулы (2) видно, что при ламинарном потоке зависимость  $\Delta P$  от  $Q$  должна быть линейной. При возникновении турбулентности линейность графика нарушается: разность давлений растет быстрее, чем расход.
6. По угловому коэффициенту прямолинейного участка графика определите вязкость воздуха  $\eta$ . Оцените погрешность определения этого коэффициента и вычислите ошибку полученного значения вязкости.
7. Вычислите значение числа Рейнольдса  $Re$  для переходной области между ламинарным и турбулентным течениями.
8. При расходе, заведомо обеспечивающем ламинарность потока, измерьте распределение давления вдоль трубки. Для этого микроманометр последовательно подсоедините ко всем ее выводам, включая и вывод «0» (рис. 2). Постройте график зависимости давления от длины вдоль трубки  $P = f(l)$ . Из графика оцените длину участка, на котором происходит установление потока. Сравните найденный результат с результатом, вычисленным по формуле (3).
9. Для всех трубок на участках со сформированным течением (в конце трубок) в ламинарном режиме ( $Re < 500$ ) снимите зависимости  $Q = f(P)$ . Обработайте результаты по формуле

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

Постройте график в двойном логарифмическом масштабе, т. е. по оси ординат отложите  $\ln(8\eta Q / \pi(P_1 - P_2))$ , а по оси абсцисс —  $\ln r$ . Нетрудно увидеть, что тангенс угла наклона полученной прямой должен дать значение  $n$ , т. е. показатель степени, который по формуле Пуазейля

должен быть равен 4. Проверьте, выполняется ли это. Оцените ошибку измерений.

### Контрольные вопросы

1. Какой формулой описывается профиль скорости ламинарного потока в трубке? Как соотносятся средняя по сечению и максимальная скорости?
2. Что такое число Рейнольдса? Как его можно определить из экспериментальных данных?
3. Как графически надо обрабатывать результаты измерений по п. 8, чтобы из них достоверно было видно различие участков со сформированным и несформированным течениями?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. I. — М.: Наука, 1996. §§ 96, 97.
2. *Хайкин С.Э.* Физические основы механики. — М.: Наука, 1971. Гл. XVI, § 125.
3. *Ландау Л.Д., Ахиезер А.Л., Лифшиц Е.М.* Механика и молекулярная физика. — М.: Наука, 1969. Гл. XV, §§ 117–119.
4. *Стрелков С.П.* Механика. — М.: Наука, 1975. Гл. XII, § 111.