

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА  
ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА  
КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ**

**САМАРА 2012**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний к лабораторной работе № 1-22*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2012

УДК 53(075)  
ББК 22.313

Составители: *Н.М.Рогачев, В.А. Гусев*

Рецензент В.В. Б и р ю к, доктор технических наук, профессор

**Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом:** Метод. указания к лаб. работе №1-22 / *Сост. Н.М. Рогачев, В.А.Гусев.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 24 с.

УДК 53(075)  
ББК 22.313

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2012

## *Лабораторная работа № 1-22*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ**

*Цель работы:* изучение явления внутреннего трения в газе и определение коэффициента вязкости воздуха.

*Приборы и принадлежности:* лабораторная установка ФПТ 1-1.



## 1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Внутреннее трение (*вязкость*) возникает между двумя слоями газа или жидкости, перемещающимися параллельно друг другу с разными по модулю скоростями. Причиной внутреннего трения в газах является перенос импульса из одного слоя в другой.

В случае одномерного движения явление вязкости описывается законом Ньютона:

$$dF = \eta \frac{du}{dx} dS, \quad (1)$$

где  $dF$  – сила внутреннего трения, действующая на площадку  $dS$ ,  $du/dx$  – градиент скорости движения слоев в направлении  $x$ , перпендикулярном площадке  $dS$ ,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости.

Согласно молекулярно-кинетической теории коэффициент динамической вязкости

$$\eta = (1/3)\langle\lambda\rangle\langle v\rangle\rho, \quad (2)$$

где  $\langle v \rangle$  – средняя скорость теплового движения молекул,  $\langle \lambda \rangle$  – средняя длина свободного пробега молекул,  $\rho$  – плотность газа.

Коэффициент динамической вязкости не зависит от давления газа и растет с повышением температуры пропорционально  $\sqrt{T}$ .

Для определения коэффициента вязкости газов может быть применен капиллярный метод. Рассмотрим движение вязкой жидкости или газа по трубке круглого сечения. При малых скоростях потока движение оказывается *ламинарным* (слоистым), скорости частиц медленно меняются от точки к точке и направлены вдоль оси трубки. С увеличением скорости потока движение становится *турбулентным* (вихревым), 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 (ламинарное или турбулентное) определяется безразмерным числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{uR\rho}{\eta} \quad (3)$$

где  $u$  – скорость потока,  $R$  – радиус трубки.

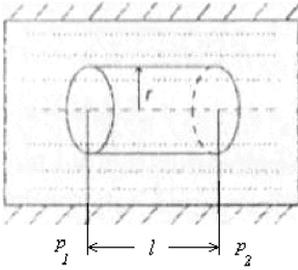


Рис. 1

В гладких трубках круглого сечения переход от ламинарного движения к турбулентному происходит при числе  $Re \sim 1000$ .

Пусть стационарный поток газа или жидкости ламинарно течет через капилляр круглого сечения (рис. 1), имеющий радиус  $R$ .

Мысленно выделим в потоке цилиндрический объем радиуса  $r$  и длины  $l$ . Обозначим давление газа на входе в цилиндр через  $p_1$ , а на выходе –  $p_2$ . В стационарных условиях сила давления газа на цилиндр  $F = (p_1 - p_2)nr^2$  уравновешивается силой трения, действующей на цилиндр со стороны наружных слоев газа.

Эта сила

$$F_{mp} = S\eta \frac{du}{dr},$$

где  $S = 2\pi rl$  – площадь боковой поверхности цилиндра,  $\eta$  – вязкость,  $du/dr$  – градиент скорости. Поскольку сумма сил, действующих на цилиндр, равна нулю, получим:

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 + 2\pi r l \eta \frac{du}{dr} = 0 \quad (4)$$

Интегрируя выражение (4), найдем:

$$u = -\frac{(p_1 - p_2)r^2}{4\eta l} + C, \quad (5)$$

где  $C$  – константа интегрирования, определяемая из граничных условий. Так как скорость жидкости обращается в нуль при  $r = R$ , то

$$C = (p_1 - p_2)R^2/(4\eta l). \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) имеем:

$$u = (p_1 - p_2)(R^2 - r^2)/(4\eta l). \quad (7)$$

Таким образом, скорость газа квадратично изменяется с радиусом и максимальна на оси трубки (при  $r = 0$ ).

Используя выражение (7), найдем объемный расход газа  $Q$ , т.е. объем, ежесекундно протекающий через поперечное сечение трубки:

$$Q = V/t = \int_0^R 2\pi \cdot u \cdot r \cdot dr = \pi \cdot R^4 (p_1 - p_2) / (8 \cdot \eta \cdot l). \quad (8)$$

Уравнение (8) называется *формулой Пуазейля*. Она позволяет определять вязкость газа по его расходу, зная перепад давления  $p_1 - p_2$ , длину трубки  $l$  и радиус  $R$ . Формула (8) справедлива только при ламинарном течении газа (или жидкости), когда число Рейнольдса  $Re < 1000$ . Необходимо также, чтобы при течении сквозь трубку не происходило существенного изменения объемного расхода газа (при выводе формулы расход газа 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 (8) выводится для участков трубки, на которых закон распределения скоростей газа по сечению не меняется при движении вдоль потока.

Если истечение газа совершается через достаточно короткий капилляр (как в нашем случае), то давление, под которым находится газ у входа в капилляр, незначительно отличается от давления у выхода из капилляра. Тогда плотность газа вдоль оси капилляра остается практически неизменной, газ можно считать несжимаемым, и для определения коэффициента динамической вязкости можно использовать выражение:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8lQ}, \quad Q = \Delta V / \Delta t, \quad (9)$$

где  $\Delta V$  – объем газа, протекшего через капилляр длиной  $l$  за время  $\Delta t$ ,  $\Delta p$  – разность давлений на концах капилляра.

## 2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Определение коэффициента вязкости воздуха капиллярным методом основано на следующем явлении: при прокачке воздуха через тонкую трубку часть входного давления теряется на преодоление сил внутреннего трения – вязкости. В работе используется функциональная зависимость (9) между длиной  $l$  и радиусом  $R$  трубки, расходом воздуха  $Q$ , потерей (падением) давления  $\Delta p$  и коэффициентом вязкости  $\eta$ .

Схема экспериментальной установки представлена на (рис. 2)

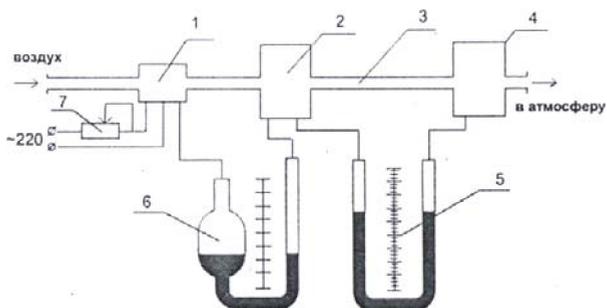


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

1 – микрокомпрессор; 2 – резервуар; 3 – капилляр; 4 – резервуар;  
5 – манометр; 6 – реометр; 7 – потенциометр.

Атмосферный воздух засасывается микрокомпрессором 1, который создает давление в магистрали установки. Потенциометром 7 «Воздух» осуществляется регулировка расхода воздуха, протекающего через металлическую трубку 3 (капилляр). Трубка 3 помещается между двумя резервуарами 2 и 4, которые имеют отверстия для присоединения манометра 5 и реометра 6. Водяной манометр 5 позволяет измерять перепад давления воздуха на входе и на выходе из капилляра. Давление измеряется в мм водяного столба (1 мм вод.ст. = 9,8 Па). Реометр 6 установлен для измерения объемного расхода воздуха через капилляр. Через отверстие в резервуаре 4 воздух выбрасывается в атмосферу.

Экспериментальная установка ФПТ-1 представляет собой конструкцию настольного типа, состоящую из трех основных частей (рис. 3): 1 – блок рабочего элемента РЭ-1); 2 – приборный блок БП-1; 3 – стойка.

На лицевой панели приборного блока БП-1 находятся органы управления и регулирования установки.

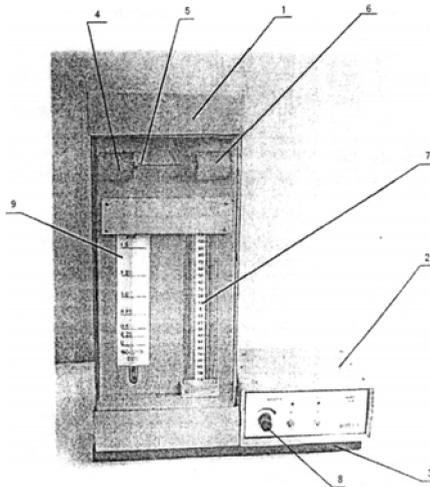


Рис. 3. Общий вид установки ФПТ 1-1 – блок рабочего элемента РЭ-1; 2 – блок приборный БП-1; 3 – стойка; 4 – резервуар; 5 – рабочий элемент; 6 – резервуар; 7 – манометр; 8 – ручка регулировки расхода воздуха; 9 – реометр.

В состав блока РЭ-1 входит рабочий элемент 5, представляющий собой металлический капилляр, закрепленный между двумя резервуарами 6. В приборном блоке БП-1 установлен также микрокомпрессор. Реометр 9 и манометр 7 присоединены к резервуарам 6 с помощью резиновых трубок.

Стойка 3 представляет собой настольную конструкцию, на горизонтальном основании которой установлены приборный блок БП-1 и блок рабочего элемента РЭ-1. Микрокомпрессор с реометром соединяются между собой резиновой трубкой. Управление работой микрокомпрессора осуществляется потенциометром 8 с надписью «Воздух», размещенным в приборном блоке 2.

### 3. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Установить ручку управления работой микрокомпрессора «Воздух» в крайнее левое положение. С помощью этой ручки осуществляется регулировка расхода воздуха, прокачиваемого через капиллярную трубку.

2. Подать на установку питание, включив тумблер в модуле «СЕТЬ». При этом загорается сигнальная лампа.

3. Включить тумблер «ВОЗДУХ». При этом загорается сигнальная лампа.

Плавное вращая ручку «ВОЗДУХ», установить по шкале реометра расход воздуха  $Q = 0,25 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ .

4. Снять показания водяного манометра  $\Delta p$ . Значения  $Q$  и  $\Delta p$  занести в таблицу.

5. Выполнить измерения при расходах воздуха через капилляр  $Q = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $0,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $1,25 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ . Показания манометра и реометра занести в таблицу.

6. По формуле (9) вычислить коэффициент вязкости воздуха. Данные вычислений занести в таблицу.

*Примечание.* При вычислениях коэффициента динамической вязкости используются размеры капилляра: длина  $l = 0,08 \text{ м}$ ; радиус  $R = 0,4 \text{ мм}$ .

Таблица

№ п/п	$\Delta p$ , мм.вод.ст	$\Delta p$ , Па	$Q_v$ , м <sup>3</sup> /с	$\eta_v$ , Па · с	$\langle \eta \rangle$ , Па · с	$\Delta \eta_v$ , Па · с	$(\Delta \eta_v)^2$	$S$ , Па · с
1								
2								
3								
4								
5								

#### 4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Проведите оценку случайных погрешностей измерений коэффициента вязкости.

1. Найдите среднее арифметическое значение коэффициента вязкости  $\langle \eta \rangle$ :

$$\langle \eta \rangle = \sum \eta_i / n,$$

где  $n$  – число измерений.

2. Определите абсолютную погрешность отдельных измерений:

$$\Delta \eta_i = \langle \eta \rangle - \eta_i,$$

3. Найдите сумму  $\sum (\Delta \eta_i)^2$ .

4. Вычислите среднюю квадратичную погрешность:

$$S_{(\eta)} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta \eta_i)^2}{n(n-1)}}.$$

5. Определите границы доверительного интервала:  $\Delta \eta = t_{\alpha, n} \cdot S_{(\eta)}$ .

Для нахождения  $t_{\alpha, n}$  используйте таблицу коэффициентов Стьюдента.

Доверительную вероятность  $\alpha$  примите равной 0,95.

6. Запишите результаты измерений в виде:

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta \eta; \quad \alpha = 0,95; \quad n = 5.$$

7. Определите относительную погрешность измерений коэффициента вязкости:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \eta}{\langle \eta \rangle} \cdot 100\%.$$

8. По формуле (3) определите число Рейнольдса. Значение средней скорости течения воздуха в трубке рассчитайте по формуле:

$$u = Q/S,$$

где  $S = \pi R^2$  – площадь проходного сечения трубки. Плотность воздуха  $\rho_i = 1,206 \text{ кг/м}^3$  (при  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

9. По графику (рис. 4), зная комнатную температуру воздуха, определите значение коэффициента динамической вязкости, сравните его со средним значением, полученным в опытах.

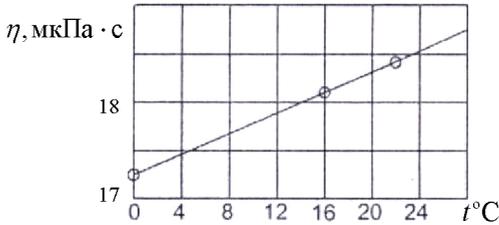


Рис. 4. Зависимость динамической вязкости воздуха от температуры (по справочным данным).

10. Сделайте выводы по проделанной работе.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое течение называется ламинарным? Турбулентным?
2. Как определяется характер течения газа в капилляре?
3. Запишите выражение для числа Рейнольдса. При каком числе Рейнольдса в гладких трубах осуществляется переход ламинарного течения в турбулентное?
4. Что такое перепад давления?
5. Выведите формулу Пуазейля.
6. Дайте понятие вязкости газа. Назовите единицу коэффициента динамической вязкости.
7. От чего зависит коэффициент динамической вязкости?
8. На каком явлении основан капиллярный метод определения коэффициента вязкости газов?

## 6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Т. 1. Механика / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1979.
2. Стрелков, С.П. Механика / С.П. Стрелков. – М.: Наука, 1975.
3. Кикоин, А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. – М.: Наука, 1976.
4. Лабораторные занятия по физике. /Под ред. Гольдина Л.Л. – М.: Наука, 1983.

*Учебное издание*

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ

*Методические указания  
к лабораторной работе № 1-22*

Составители: ***Николай Михайлович Рогачев  
Владимир Анатольевич Гусев***

Редактор И.И. Спиридонова  
Вёрстка – И.И. Спиридонова

Подписано в печать 02.011.2012. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Печ. л. 0,75.

Тираж 100 экз. Заказ . Арг. Д(18)/2012.

Самарский государственный аэрокосмический университет.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.