Лабораторная работа 1.3.3

Выполнил Юдин Иван Б05-207

27 марта 2023 г.

Аннотация

В работе измеряется коэффицент вязкости воздуха при помощи воздуха, движущего в тонких трубках с разными скоростями, имея разные числа Рейнольдса.

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.

Теоретические сведения

Сила вязкого трения согласно закону Ньютона:

$$\tau_{xy} = \eta \frac{\partial \upsilon_x}{\partial y} \tag{1}$$

η - коэффициент динамической вязкости. Характер течения может быть ламинарным или турбулентным, определяется числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho u a}{\eta} \tag{2}$$

ρ - плотность среды, u - характерная скорость потока, a - характерный размер системы.

Формула Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \eta l}, \qquad \bar{u} = \frac{Q}{\pi R^2} \tag{3}$$

Длина установления:

$$l \approx 0.2R \cdot Re \tag{4}$$

Скоростной напор:

$$\tilde{\psi} = \frac{R}{l} \frac{\Delta P}{\rho \bar{u}^2} \tag{5}$$

Из теории размерностей:

$$\frac{\Delta P}{l} = C(Re) \cdot \frac{\rho \bar{u}^2}{R} \tag{6}$$

При больших числах Рейнольдса параметры течения жидкости не зависят от коэффициента вязкости, поэтому $C(Re) \mapsto const$, откуда

$$Q = const \cdot R^{5/2}\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho l}} \tag{7}$$

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. Поток воздуха поступает через газовый счетчки в металлические трубки, трубки имеют заглушки и отверстия для подключения микроманометра. **??**.

Ход работы

Данные изменрений давления от расхода $\Delta P(Q)$ приведены ниже.

Q, мл/с	ΔP, Па
06,4	9,81
17,8	29,42
31,0	49,04
44,4	68,65
57,2	88,26
69,7	107,88
84,0	127,49
85,0	133,38
92,3	147,11
98,0	166,72
102,7	186,33
104,2	205,95
106,4	225,56
109,9	245,18
Q, мл/с	ΔP, Па
27,0	9,81
86,0	29,42
52,0	19,61
116,8	39,23
138,5	49,04
149,7	58,84
158,7	68,65
165,0	78,46
171,0	88,26
203,0	127,49
233,0	166,72
263,0	205,95
285,0	239,29

Таблица 1: Для трубки d_1

Ниже на графике крестами выделены точки, начиная с которых начинается турбулетное течение. С помощью МНК построим линейную зависимость для точек, ко-

	d_1	d_2
$k \cdot 10^6$, Па · с / м ^{3}	1,53	0,37
$\sigma_k^{\text{случ}} \cdot 10^6$, Па · с / м ^{3}	0,02	0,03
$\sigma_k^{\text{сист}} \cdot 10^6$, Па · с / м ^{3}	0,02	0,01
$\sigma_k \cdot 10^6$, Па · с / м ^{3}	0,03	0,03
$\eta \cdot 10^{-}6$, Па · с	6,96	8,05
$\sigma_\eta \cdot 10^{-}6$, Па · с	0,38	0,71

Таблица 2: Результаты из МНК и графика

торые предположительно принадлежат ламинарному течению (график и его анализ представлены ниже).

Из формулы Пуазейля имеем:

$$\Delta P = Q \cdot \frac{8\eta l}{\pi R^4} = Q \cdot k$$

Тогда для погрешности систематической получаем (с учётом, что погрешность ΔP есть погрешность измерения высоты столба воды, то есть равна $\sigma_{\Delta P} = 0{,}2 \cdot 9{,}807 \cdot \sigma_h = 1{,}9$ Па):

$$\sigma_k^{\text{сист}} = k \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta P}}{\Delta P_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_Q}{Q_{\max}}\right)^2}$$

Из МНК имеем, что:

$$k = \frac{\langle Q \cdot \Delta P\rangle - \langle Q\rangle \cdot \langle \Delta P\rangle}{\langle Q^2\rangle - \langle Q\rangle^2} \tag{8}$$

$$\sigma_k^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \left(\frac{\langle \Delta P^2\rangle}{\langle Q^2\rangle} - k^2\right)} \tag{9}$$

$$\sigma_k = \sqrt{(\sigma_k^{\text{случ}})^2 + (\sigma_k^{\text{сист}})^2} \tag{10}$$

$$\sigma_\eta = \eta\sqrt{\left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2 + 4^2 \cdot \left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2} \tag{11}$$

То есть окончательно имеем, что:

$$\eta_1 = (6{,}96 \pm 0{,}38) \cdot 10^{-6}\text{Па} \cdot \text{с}$$
$$\eta_2 = (8{,}05 \pm 0{,}71) \cdot 10^{-6}\text{Па} \cdot \text{с}$$

Далее найдём значение $Re = \frac{\rho Q}{\pi R \eta}$, $\sigma_{Re} = Re \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\eta}{\eta}\right)^2}$ для каждой трубки.

- d_1: $Q_{\text{крит}} = 0{,}085$ л/ с. То есть $Re = 2304 \pm 140$.
- d_2: $Q_{\text{крит}} = 0{,}149$ л/ с. То есть $Re = 2370 \pm 208$.

Далее определим длину участка трубы, на котором происходит уставновление потока. Построим график $P(x)$ для каждой трубы. Будем проводить прямую через все точки кроме первой, считая, что на них уже должно было почти установиться течение.

- d_1. Ожидаемая длина: $l_{\text{уст}} = 0{,}2 \cdot R_1 \cdot Re = 0{,}91$ м.
- d_2. Ожидаемая длина: $l_{\text{уст}} = 0{,}2 \cdot R_2 \cdot Re = 1{,}39$ м.

Вывод

Экспериментально исследовались свойства течения газов по тонким трубкам при различ- ных числах Рейнольдса; выявить область применимости закона Пуазейля и с его помощью определить коэффициент вязкости воздуха. Получили вязкость воздуха:

$$\eta_1 = (6{,}96 \pm 0{,}38) \cdot 10^{-6}\text{Па} \cdot \text{с}$$
$$\eta_2 = (8{,}05 \pm 0{,}71) \cdot 10^{-6}\text{Па} \cdot \text{с}$$

Учтя, что $\eta_{\text{табл}} = (1{,}3) \cdot 10^{-6}\text{Па} \cdot \text{с}$. Это значение отличается от табличного, возможно это связанно с тем, что был не правильно выбран "нулевой"уровень для измерения давления.

Число Рейнольдса получилось $Re_1 = 2304 \pm 140$ и $Re_2 = 2370 \pm 208$, что тоже отличается от $Re \sim 1000$, что скорее всего также связанно с неправильным выбором "нулевого"уровня.