

Измерение вязкости воздуха по течению в тонких трубках (1.3.3)

Павлушкин Вячеслав

15 мая 2022 г.

1 Аннотация

В данной работе проводится экспериментальное выявление участка сформировавшегося ламинарного течения; экспериментально определяются режимы ламинарного и турбулентного течения; проводится определение числа Рейнольдса.

2 Введение

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 микроанометр с регулируемым наклоном; набор трубок различного диаметра с выходами для подсоединения микроанометра; секундомер

3 Теоретические сведения

Характер движения газа по трубке определяется числом Рейнольдса:

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

где u - скорость потока, r - радиус трубки, ρ - плотность жидкости, η - вязкость. Переход от ламинарного движения к турбулентному: $Re \sim 1000$.

Для ламинарного течения при постоянном удельном объеме верна формула Пуазейля:

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

где $P_1 - P_2$ - разность давлений в двух сечениях, расстояние между которыми - l . Формула позволяет определить вязкость по расходу Q_V .

Ламинарное течение газа устанавливается на расстоянии

$$a \sim 0.2r \cdot Re.$$

Градиент давления на участке с турбулентным течением больше, чем на участке с ламинарным, что позволяет разделить их экспериментально.

4 Ход работы

В работе использовались 3 трубки, диаметрами: $d_1 = (3.0 \pm 0.1)$ мм, $d_2 = (3.95 \pm 0.05)$ мм, $d_3 = (5.05 \pm 0.05)$ мм.

Для каждой трубки снимем зависимость $Q(\Delta P)$, с помощью секундомера и газового счетчика ($\sigma_v = 0.05$ Дц³/м) получим расход, с помощью микроманометра – разность давления на участке трубы ($\sigma_{\Delta P} = 0,5$ Дел. = 0.1 Па).

Проведем эксперимент для каждой трубы, на участке с наибольшей длиной, и получим таблицы:

$d_2 = 3.95$ мм			
V , Дц ³	t , с	ΔP , Дел.	$Q \cdot 10^{-6}$, м ³ /с
0.3	86.45	3	3
0.5	38.61	10	13
0.5	20.49	19	24
1	28.04	28	36
1	20.60	39	49
1.5	24.06	49	62
2	27.26	60	73
2	24.14	68	83
2	21.12	82	95
2.5	24.66	91	101
2.5	23.68	102	106
2.5	23.15	113	108
2.5	23.02	131	109
2.5	19.52	180	128
4	26.21	250	153

$d_3 = 5.05$ мм			
V , Дц ³	t , с	ΔP , Дел.	$Q \cdot 10^{-6}$, м ³ /с
1	35.29	7	28
1.5	27.98	14	54
1.5	22.98	18	65
2	25.65	20	78
2	20.13	26	99
2.5	21.66	30	115
2.5	21.14	33	118
3	22.83	39	131
3	22.15	42	135
3.5	22.40	61	156
3.5	20.35	78	172
4	19.77	103	202
5	21.84	130	229
5.5	21.79	155	252
5.5	20.74	171	265

Таблица 1: Результаты измерений двух трубок

По полученным таблицам построим график $Q(\Delta P)$ по точкам на ламинарном участке (первые точки таблицы – ламинарный поток, вторая половина – турбулентный).

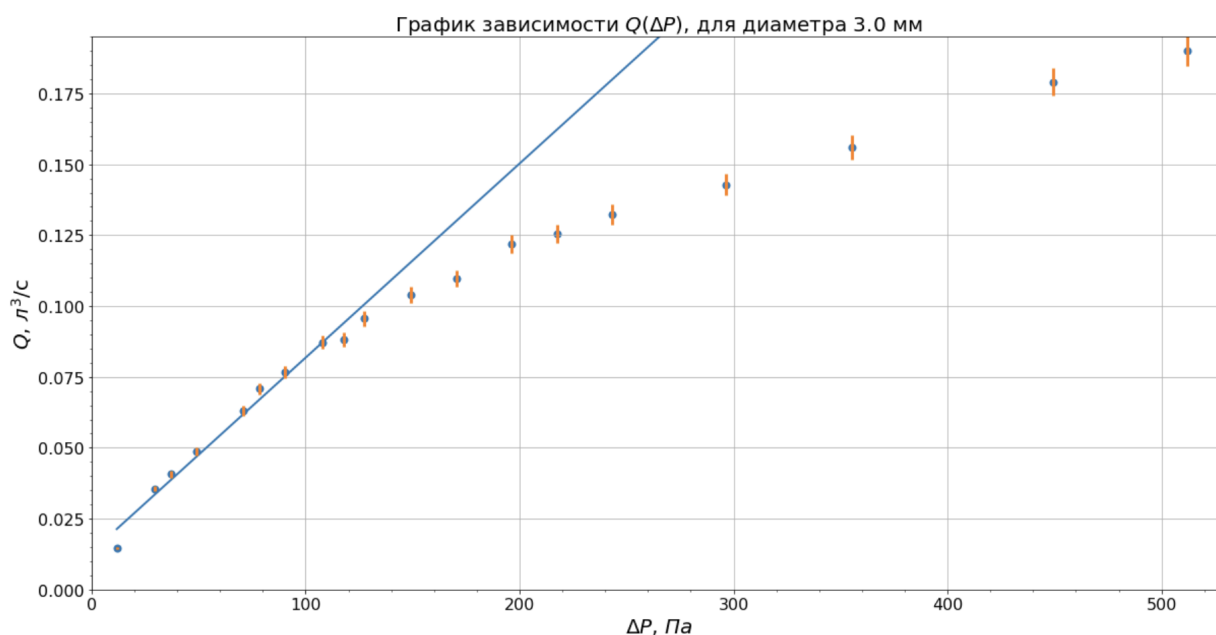


Рис. 1: График зависимости $Q(\Delta P)$, для трубки диаметра 3.0 мм

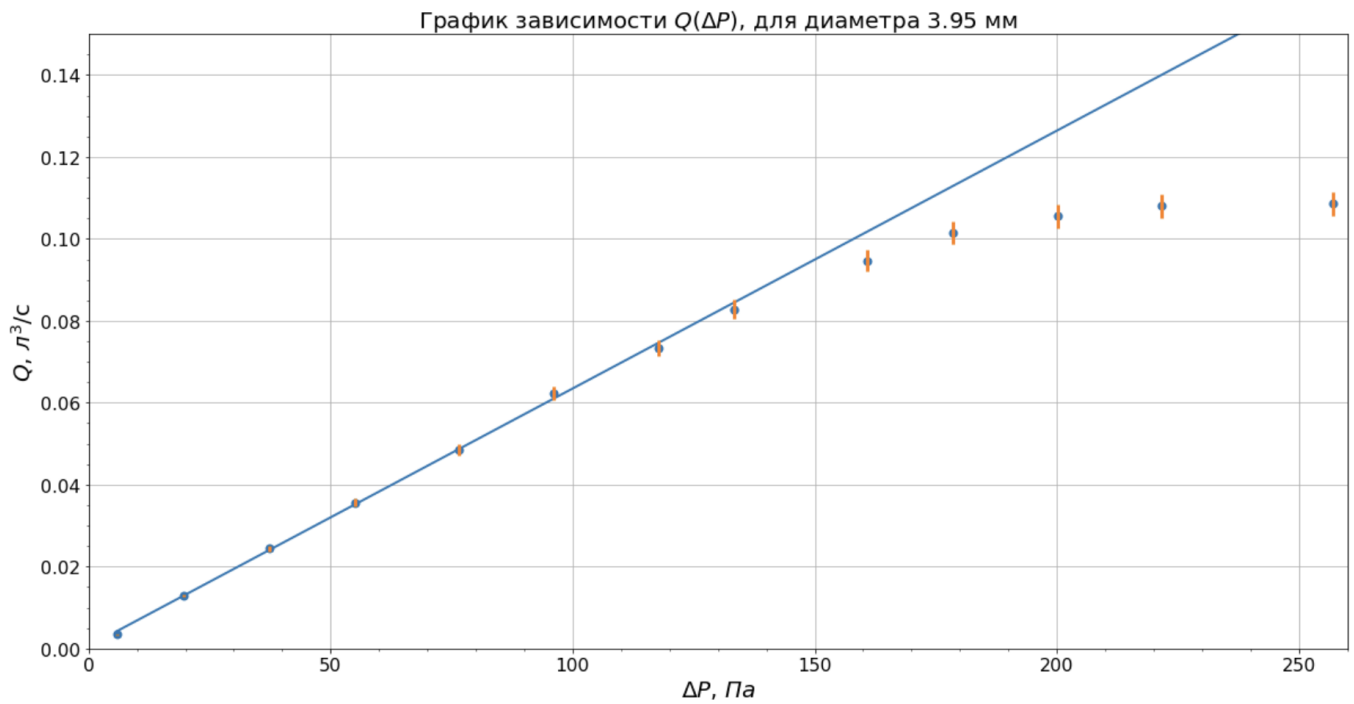


Рис. 2: График зависимости $Q(\Delta P)$, для трубки диаметра 3.0 мм

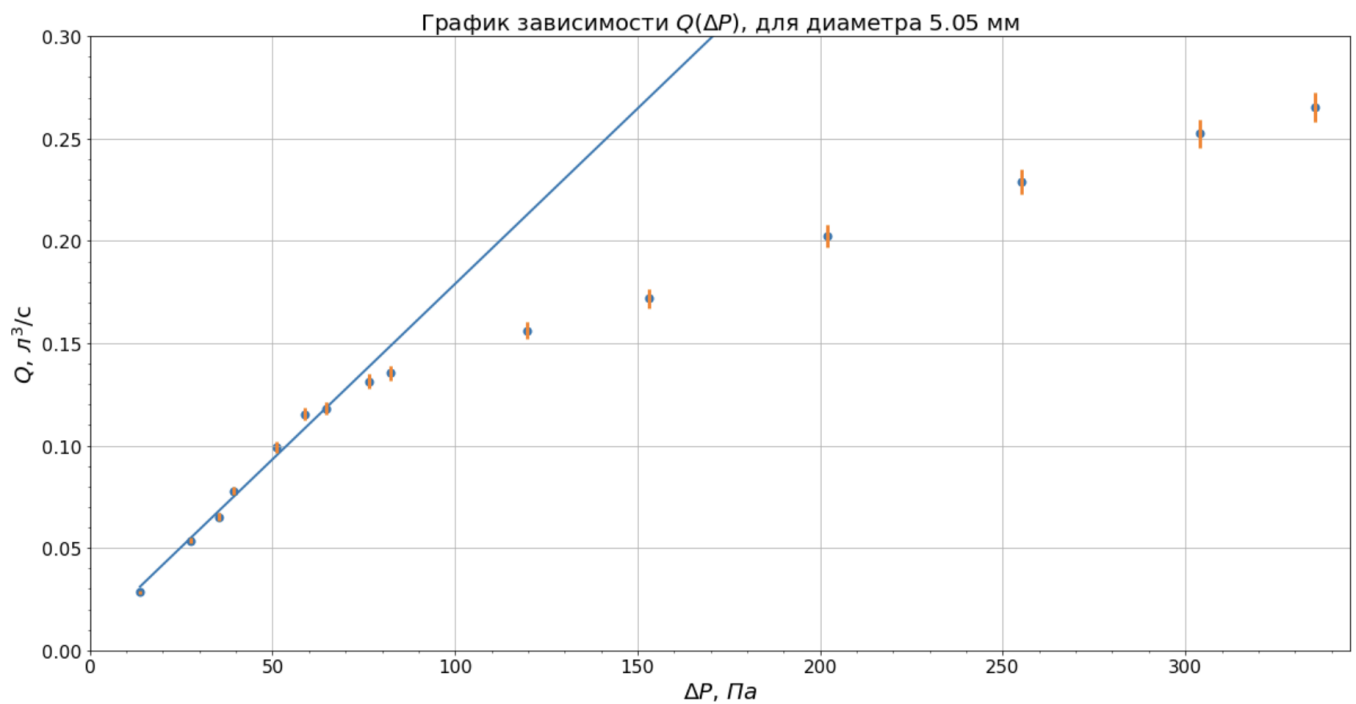


Рис. 3: График зависимости $Q(\Delta P)$, для трубки диаметра 5.05 мм

Линии проведены при помощи МНК, по точкам с ламинарным течением.

С помощью коэффициентов наклона мы можем найти вязкость воздуха из формулы (1):

$$\eta = \frac{\pi R^4}{8kl}$$

где k – коэффициент наклона графика, l – длина участка трубы, а R – радиус трубки.

По графикам определим значения коэффициента наклона с погрешностями:

	$d_1 = 3.0 \text{ мм}$	$d_2 = 3.95 \text{ мм}$	$d_3 = 5.05 \text{ мм}$
$k \cdot 10^{-7}, \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{Па}$	6.85	6.29	17.14
$\sigma_k^{\text{случ}}, \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{Па}$	0.41	0.09	0.90
$\sigma_k, \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{Па}$	0.47	0.22	1.06
$\eta \cdot 10^{-5}, \text{ Па} \cdot \text{с}$	1.45	1.89	1.86
$\sigma_\eta \cdot 10^{-5}, \text{ Па} \cdot \text{с}$	0.14	0.08	0.12

Таблица 2: Результаты полученные из графиков

Заметно, что первое измерение достаточно сильно отличается от двух следующих, тогда возьмем, без учета первого диаметра:

$$\eta = (1.88 \pm 0.1) \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Далее найдем критическое число Рейнольдса $Re_{\text{кр}}$ для всех трубок:

$$Re = \frac{\rho u R}{\eta} = \frac{\rho Q}{\pi R \eta}$$

- $d_1 = 3.00 \text{ мм}$: критический расход: $Q_1 = 91 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, тогда $Re_1 = 1181 \pm 70$.
- $d_2 = 3.95 \text{ мм}$: критический расход: $Q_2 = 78 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, тогда $Re_2 = 763 \pm 40$.
- $d_3 = 5.05 \text{ мм}$: критический расход: $Q_3 = 131 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, тогда $Re_3 = 1010 \pm 45$.

Далее определим длину участка трубы, на котором происходит установление потока. Для этого построим графики зависимости $P(x)$ для каждой трубы.

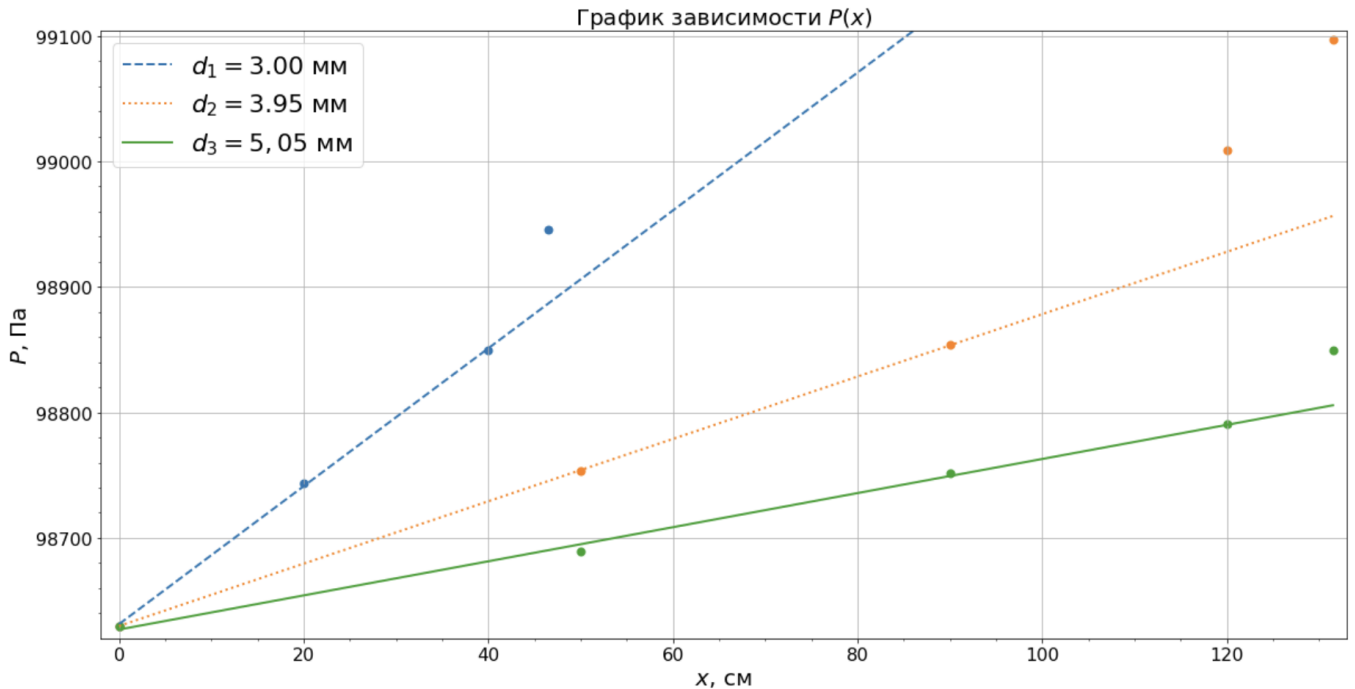


Рис. 4: График зависимости $P(x)$

По графику можно определить примерную длину участка, на котором устанавливается ламинарный поток (на графике отсчитывается от выхода трубы, я же рассматриваю длину на которой устанавливается поток, то есть от входа воздуха):

- $d_1 = 3.00$ мм, по графику поток устанавливается через 6.5 - 0 см от входа. По расчетам ($L_{уст} \approx 0.2R_1 \cdot Re_1$) получается 11.5 см. На мой взгляд полученный результат удовлетворительный.
- $d_2 = 3.95$ мм, по графику поток устанавливается через 41.5 - 0 см от входа. По расчетам ($L_{уст} \approx 0.2R_2 \cdot Re_2$) получается 30.1 см. Результат сходится с вычисленным.
- $d_3 = 5.05$ мм, по графику поток устанавливается через 41.5 - 0 см от входа. По расчетам ($L_{уст} \approx 0.2R_3 \cdot Re_3$) получается 51 см. Возможно, что формула примерная, поэтому я считаю, что данный результат тоже достаточно удовлетворительный.

Для проверки пропорциональности расхода к радиусу трубы при ламинарном и турбулентном режиме построим графики $\ln Q(\ln R)$ для разных труб при установившемся и неустановившемся течении.

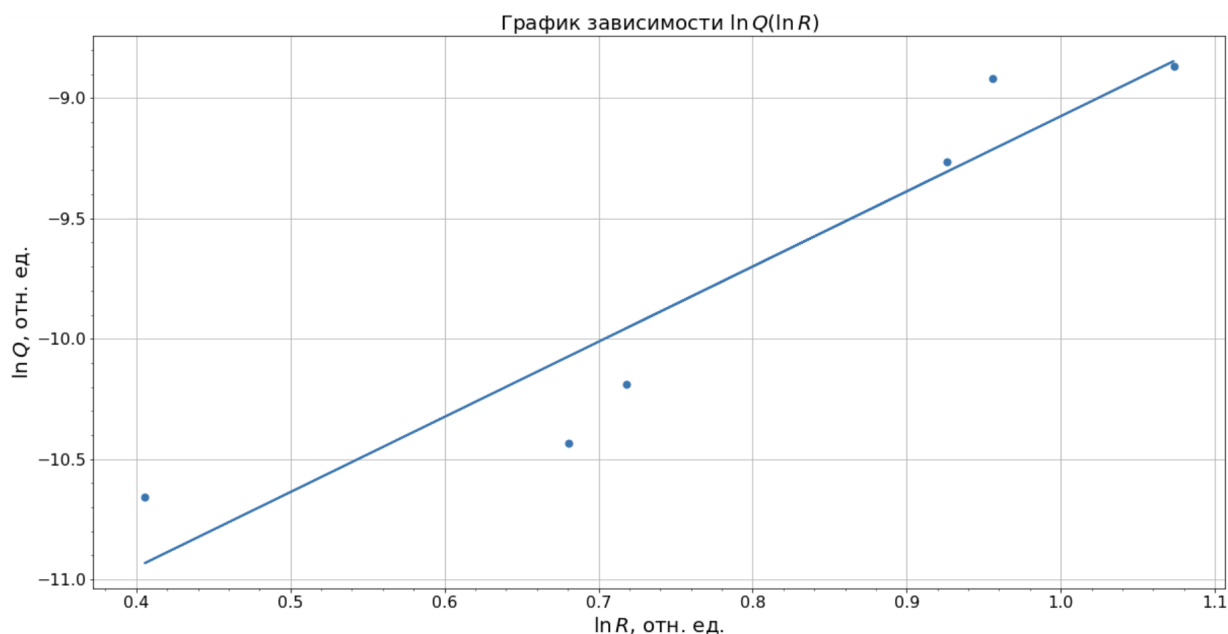


Рис. 5: График зависимости $P \ln Q(\ln R)$ для ламинарного течения

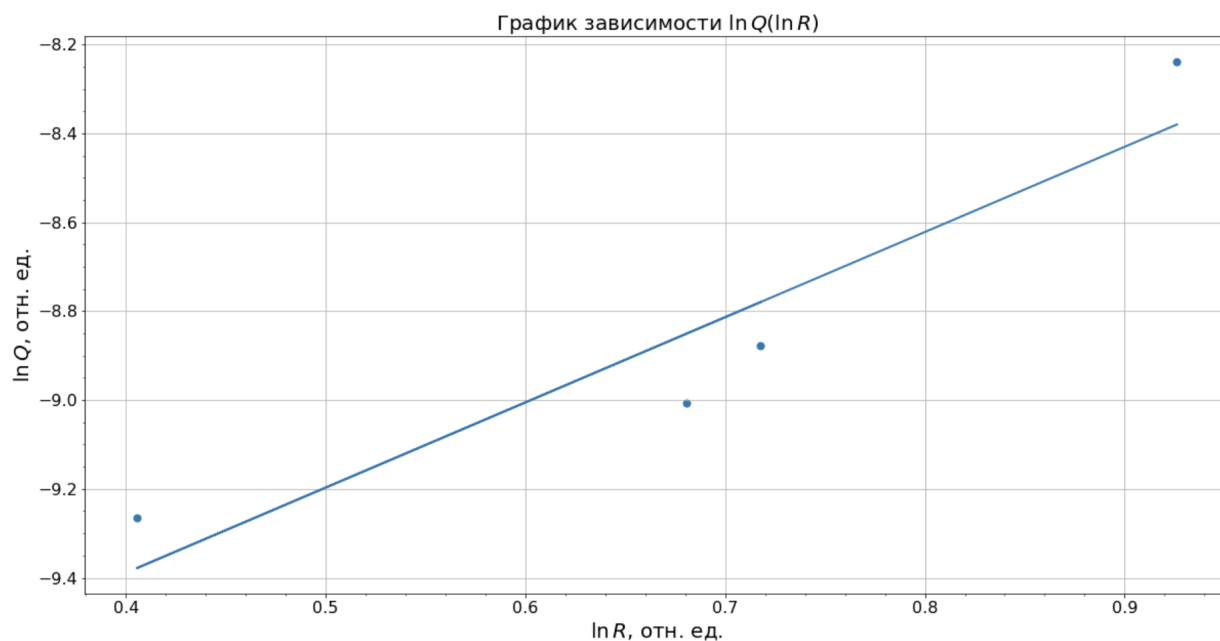


Рис. 6: График зависимости $\ln Q(\ln R)$ для турбулентного течения

Полученные коэффициенты по графикам:

- Для ламинарного течения: $\beta_{\text{уст}} = 3.13 \pm 0.56$.
- Для турбулентного течения: $\beta_{\text{тур}} = 1.92 \pm 0.50$.

5 Вывод

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

$$\eta = (1.88 \pm 0.1) \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Сравнили зависимость расхода при ламинарном и турбулентном течении в зависимости от радиуса трубы:

- Для ламинарного течения теоретический коэффициент: $\beta = 4$; Экспериментальный: $\beta_{\text{уст}} = 3.16 \pm 0.56$.
- Для турбулентного течения теоретический коэффициент: $\beta = 2.5$; Экспериментальный: $\beta = 1.92 \pm 0.50$.