

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Нарбутова Анастасия Александровна

КУРСОВАЯ РАБОТА

Экспериментальное исследование течения методом термоанемометрии

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19301

Научный руководитель:

Катасонов М.М,
д.ф.-м.н., в.н.с. Лаб.8 ИТПМ СО РАН

Оценка научного руководителя

« ____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Судников А.В.

Оценка преподавателя практикума

« ____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

« ____ » _____ 20__ г.

Новосибирск, 2020 г.

Аннотация

В данной курсовой работе было изучено устройство термоанемометра, принцип его работы и практическое применение этих знаний на практике. При выполнении работы был определён верхний частотный предел и проведена тарировка термоанемометра. Используя изучаемый прибор, были проведены измерения параметров течения в пограничном слое прямого крыла. Введение возмущений в пограничный слой осуществлялось с помощью одиночной цилиндрической шероховатости, помещаемой на поверхности модели вблизи её носика. В эксперименте были получены распределения средней скорости и пульсаций скорости по нормали к поверхности в нескольких сечениях вдоль хорды крыла за шероховатостью с управлением и без управления.

Введение

Измерение потока воздуха и исследование пограничного слоя в аэродинамической трубе проводилось с помощью термоанемометра, прибора для измерения скорости потока жидкости или газа от 0,1 м/с и выше. Основными достоинствами термоанемометра являются возможность измерения мгновенной скорости, следовательно, и пульсаций скорости, а также высокая чувствительность (0.5 м/с и ниже). Помимо этого, данный прибор имеет и свои недостатки, например: датчик термоанемометра вносит возмущения в поток, присутствует чувствительность к загрязнениям потока, необходимость частой калибровки.

Теоретическая часть

Анемометр постоянной температуры состоит из моста Уинстона и усилителя обратной связи (рис.1). Для того, чтобы мост был сбалансирован, разность напряжений между входами усилителя должна быть равна нулю. На температуру датчика будет влиять любое изменение параметров потока, охлаждая или нагревая датчик. К появлению разности напряжений на входе усилителя приводит результирующее изменение сопротивления. Выходное напряжение усилителя приложено к мосту таким образом, чтобы температура датчика поддерживалась постоянной.

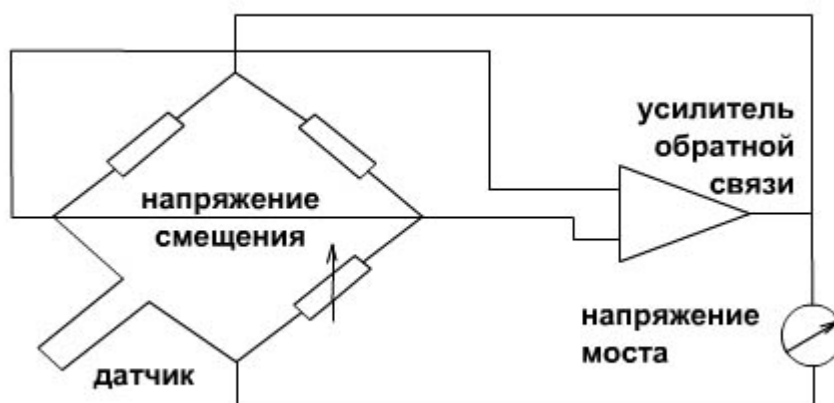


Рис.1. Схема термоанемометра постоянной температуры

Принцип действия термоанемометра основан на зависимости между скоростью потока v и теплоотдачей тонкой проволоки (изготовленной из вольфрама или платины), которая была помещена в поток и нагрета с помощью электрического тока. Тонкая проволока нагревается электрическим током до 200 - 400 °С и затем охлаждается протекающим газом или жидкостью, что снижает электрическое сопротивление нити.

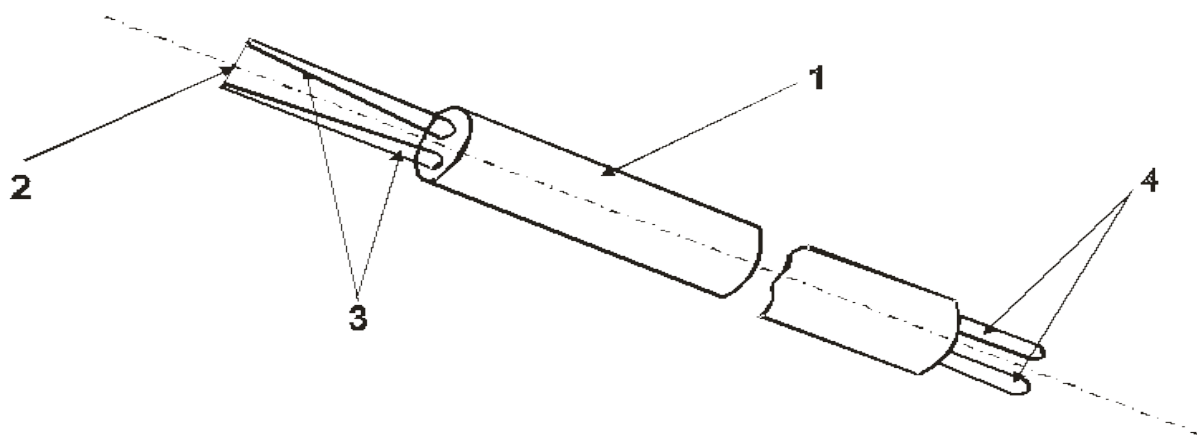


Рис 2. Конструкция датчика: 1 – корпус, 2 - нагреваемая нить, 3 – держатели, 4 - токоподводы.

Существуют два вида термоанемометров: постоянного тока и постоянного сопротивления. В данной работе используется термоанемометр постоянного сопротивления AN-1003.

Термоанемометр постоянного тока (рис.3) во время работы поддерживает постоянную силу тока и по изменению сопротивления определяет скорость потока. Вольтметр, параллельно включенный в цепь, позволяет измерить разность потенциалов на концах нити, таким образом определяя ее сопротивление.

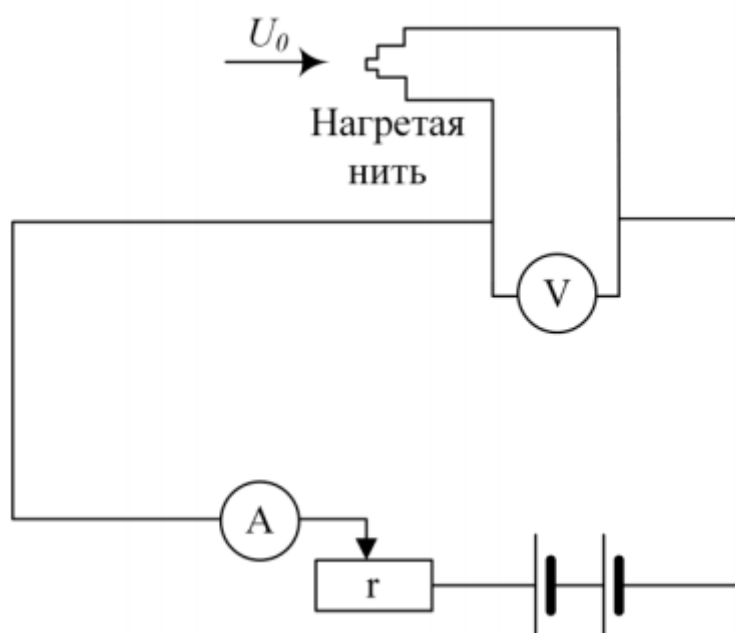


Рис.3. Термоанемометр постоянного тока

Теперь рассмотрим термоанемометр постоянного сопротивления (рис.4), который используется в моем случае. Здесь нить включена в одно из плеч моста Уитстона. Разность напряжений между входами усилителя равна нулю, так как мост сбалансирован. Изменение сопротивления происходит благодаря охлаждению или нагреву чувствительного элемента, что, в свою очередь, возникает из-за изменения скорости потока. На входе усилителя появится разность напряжений. Для того, чтобы температура датчика оставалась постоянной, к выходу усилителя прикладывается соответствующее напряжение.

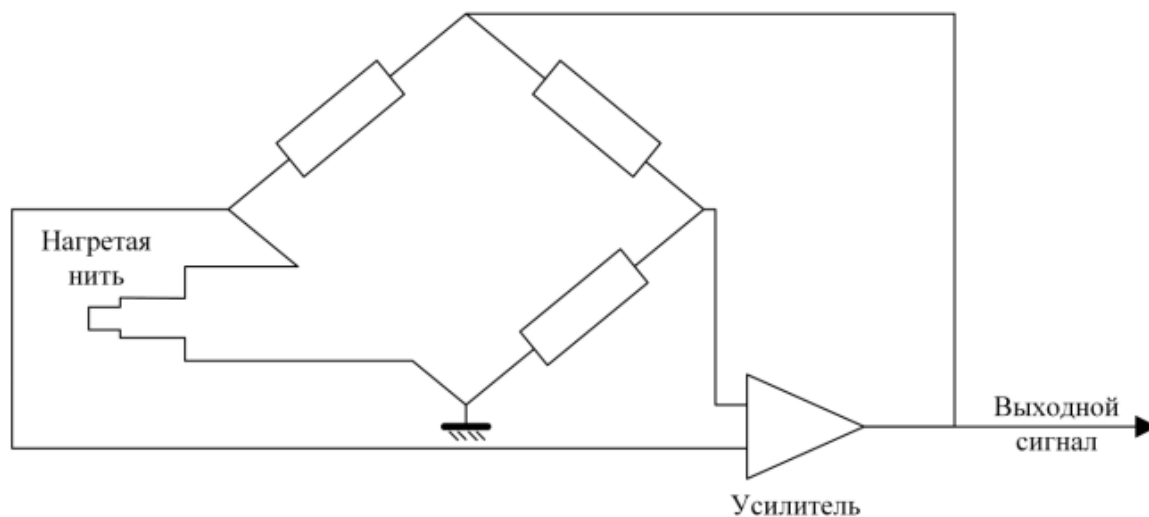


Рис.4. Термоанемометр постоянного сопротивления

Параметр теплоотдачи Nu (число Нуссельта) от нагретой нити (при непрерывном обтекании) определяется с помощью экспериментально установленной связи с числом Рейнольдса в диапазоне $0.01 < Re < 10^4$:

$$Nu = 0.42 \cdot Pr^{0.2} + 0.57 \cdot Pr^{0.33} \cdot Re^{0.5} \quad (1),$$

где Pr - число Прандтля, характеризующее соотношение между теплоёмкими и теплопроводными свойствами газа:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{k_f}; \quad Pr = \frac{c_p \cdot \mu_f}{k_f}; \quad Re = \frac{u \cdot d}{\mu_f} \quad (2),$$

где α – коэффициент теплоотдачи; k_f – коэффициент теплопроводности при температуре θ_f ; μ_f – коэффициент вязкости газа при температуре θ_f ; C_p – ёмкость газа при постоянном давлении; d – диаметр нити; u – скорость потока; $\theta_f = \frac{\theta_w + \theta_g}{2}$ – «плёночная» температура; θ_w – температура нити; θ_g – температура газа (воздуха).

Количество тепла, переносимого в единицу времени от нити длиной l с равномерно распределенной по длине температурой к окружающему газу, равно:

$$Q = \alpha \pi d l (\theta_w - \theta_f) \quad (3),$$

учитывая формулы (1) и (2), получаем

$$Q = \pi l k_f (\theta_w - \theta_f) (0.42 \cdot \text{Pr}^{0.2} + 0.57 \cdot \text{Pr}^{0.33} \cdot \text{Re}^{0.5}) \quad (4)$$

Потеря тепла в условиях равновесия компенсируется энергией, которую выделяет электрический ток:

$$Q = \frac{E^2}{R_w} \quad (5),$$

где R_w - сопротивление нити, которое линейно зависит от температуры:

$$R_w = R_g (1 - b(\theta_w - \theta_f)), \quad (6)$$

где R_g - сопротивление нити при температуре θ_f .

Приравнивая правые части уравнений (4) и (5) и пользуясь соотношением (6), получим следующее выражение:

$$E^2 = A + B \cdot \sqrt{u}. \quad (7)$$

Уравнение (7) называется законом Кинга. Этот закон связывает падение напряжения на нити датчика зависит от скорости набегающего потока. Тарировочные коэффициенты A и B равны соответственно:

$$A = \frac{\pi \cdot k_f \cdot l}{b} \cdot \frac{R_w \cdot (R_w - R_g)}{R_0} \cdot 0.42 \cdot Pr^{0.2};$$

$$B = \frac{\pi \cdot k_f \cdot l}{b} \cdot \frac{R_w \cdot (R_w - R_g)}{R_0} \cdot 0.57 \cdot Pr^{0.33};$$

Подготовка к эксперименту

Определение частотного предела термоанемометра

Для определения частотного предела термоанемометра были проведены следующие действия: на термоанемометр подавался прямоугольный импульс, в результате чего на выходе получался характерный затухающий сигнал. Осциллограмма представлена на рис.5.

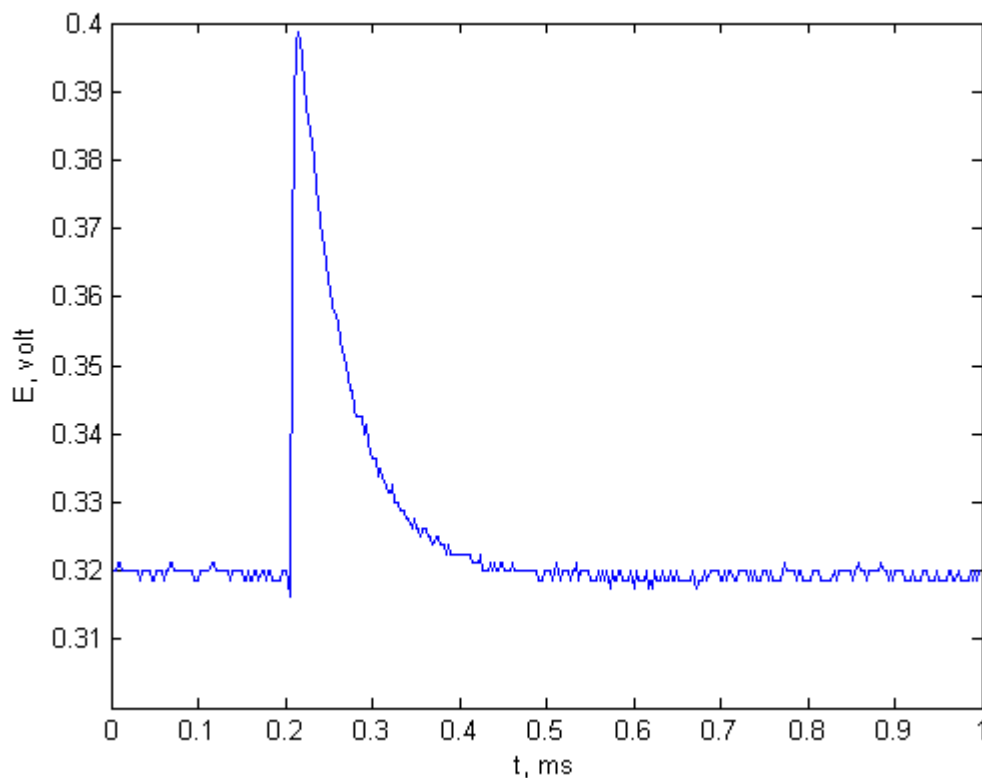


Рис.5. Осциллограмма сигнала термоанемометра после подачи на него прямоугольного импульса.

Для определения верхнего частотного предела существует два способа. Первый из них: определить по полученному графику (рис.6) время задержки τ . Максимальную частоту получим по формуле:

$$f = \frac{1}{1.6 \cdot \tau}$$

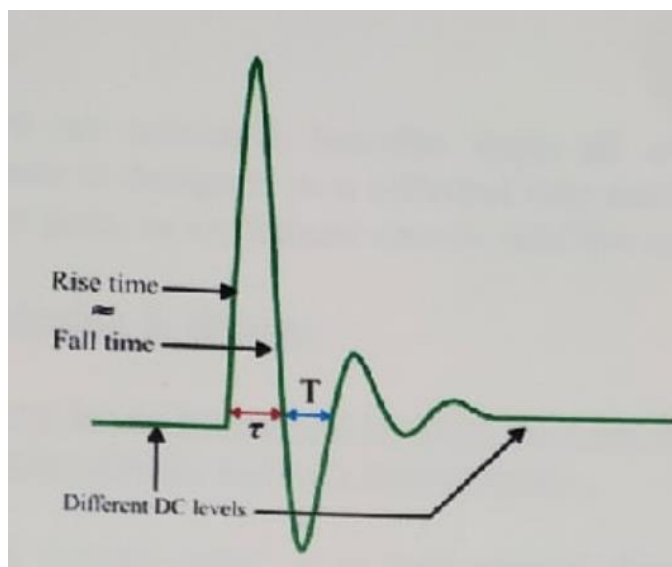


Рис.6. Импульсная характеристика τ

Ранее эти вычисления проводились по формуле $f = \frac{1}{1.3 \cdot \tau}$

В 1976 году было предположено, что на самом деле данная формула должна иметь вид $f = \frac{1}{1.6 \cdot \tau}$, а в 2004 году это было уже подтверждено в Li [1].

Второй способ для вычисления максимальной частоты, который приведён в методичке Корнилова В.И. [2], мы можем увидеть наглядно на рис.7.

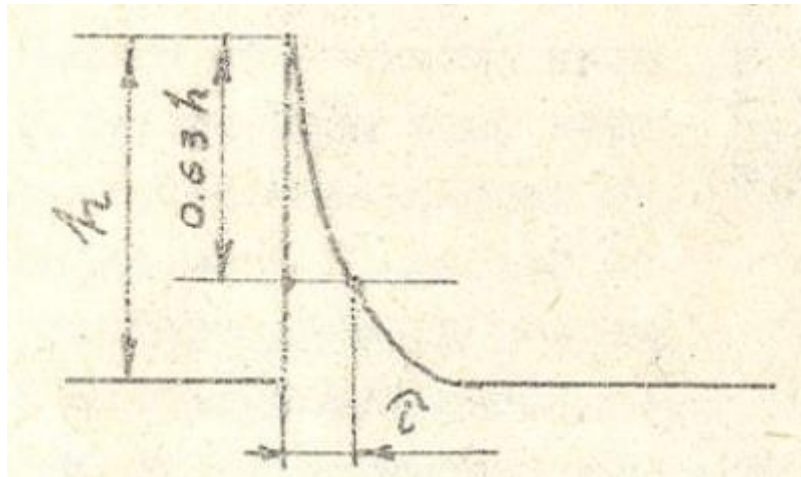


Рис.7. Отклик

Верхний частотный предел f определяем по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi\tau}$$

В нашем случае осциллограмма сигнала выглядит так же, как на рис.7, поэтому пользоваться мы будем соответствующей формулой.

$$\tau = 0.03 \cdot 10^{-3} \text{ с, откуда } f \approx 5305 \text{ Гц.}$$

Для тарировки термоанемометра был использован модифицированный закон Кинга:

$$u = k_1 \sqrt[n]{(E^2 - E_0^2)} + k_2 \sqrt{E - E_0}$$

где u – текущая скорость потока; k_1, k_2 – коэффициенты в модифицированном законе Кинга, n – показатель степени, E – текущее напряжение разбаланса моста, E_0 – напряжение разбаланса моста при отсутствии потока.

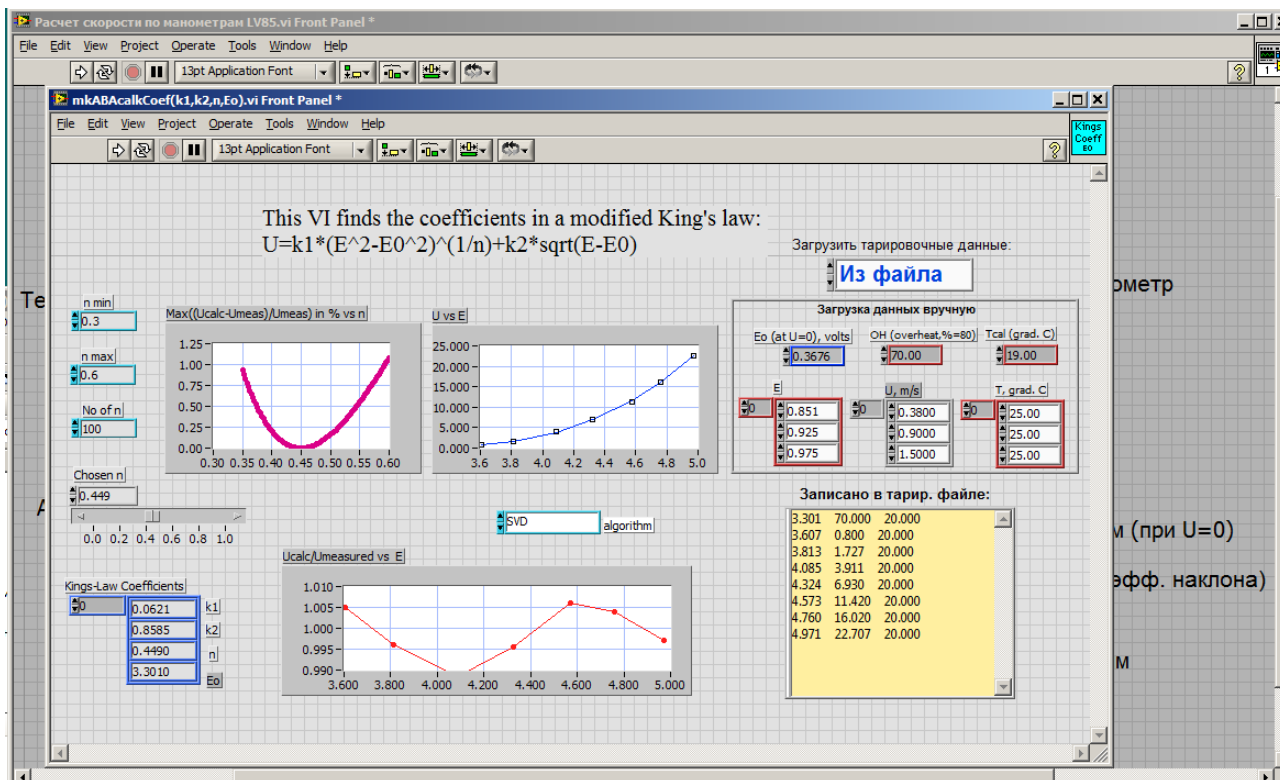


Рис.8. Программа тарировки термоанемометра

Экспериментально была получена зависимость напряжения от скорости в потоке (Табл.1), где T – температура в помещении в момент проведения тарировки. Перегрев равен 70%. С помощью программы тарировки коэффициенты определяются из Таблицы 1. В качестве критерия выбора данных коэффициентов здесь выступает наилучшее соответствие кривой модифицированного закона Кинга измеренным экспериментальным точкам. В нашем случае нам удалось получить такое соответствие с точностью $\pm 1\%$.

$k_1 = 0.0621$, $k_2 = 0.8585$, $n = 0.449$, $E_0 = 3.301$ В.

E, В	U, м/с	T, °C
3.301	0	20
3.607	0.736	20
3.813	1.727	20
4.085	3.911	20
4.324	6.930	20
4.573	11.420	20
4.760	16.020	20
4.971	22.707	20

Таблица 1. Зависимость напряжения моста от скорости потока

Экспериментальная часть

Описание опыта: на профиль прямого крыла с хордой $c = 501$ мм, размахом $z = 950$ мм и максимальной толщиной $t = 60$ мм, который расположен под углом атаки $\alpha = -6.5^\circ$, набегает поток со скоростью $U_\infty = 10.8$ м/с. Установлена шероховатость на расстоянии 215 мм от передней кромки. Высота шероховатости 2 мм, диаметр шероховатости 1.8 мм. Отсос осуществляется на 50 мм вверх и на 50 мм вниз по Z координате, относительно положения шероховатости. (Безразмерный коэффициент отсоса $C_s = \rho_s v_s / \rho_\infty U_\infty = 0.019$. ρ_s – плотность отсасываемого газа = ρ_∞). Эксперимент проводился в аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН, рабочая часть которой составляет $1 \times 1 \times 4$ метра. Схема представлена на рис.9.

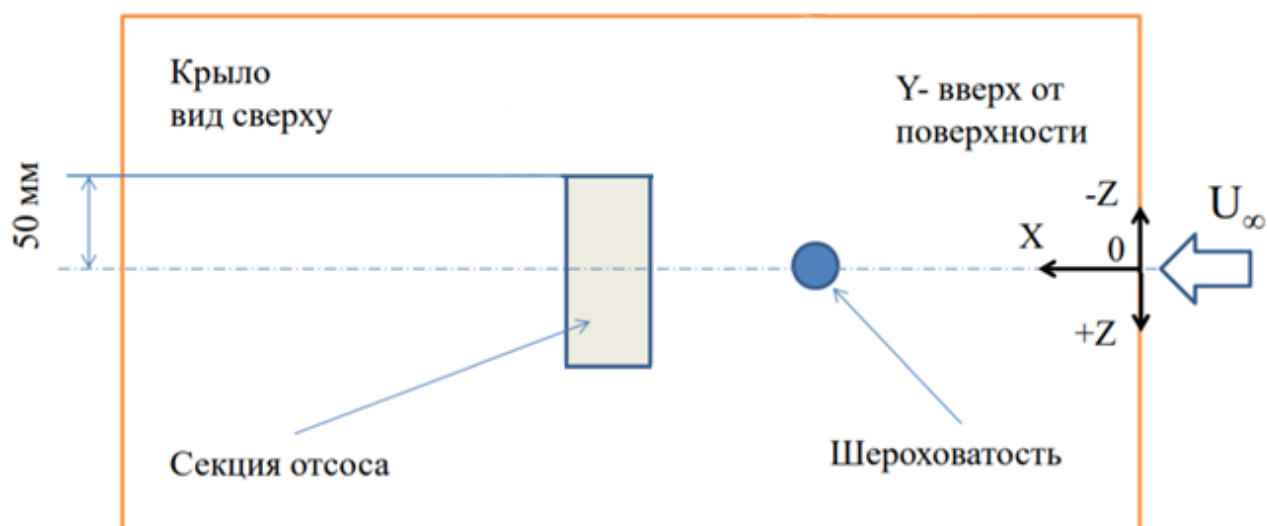


Рис.9. Схема экспериментальной установки

При движении среды около твердого тела происходит прилипание ее частиц к поверхности. Скорость среды на поверхности равна нулю. Вследствие трения соседние слои движущейся среды затормаживаются, поэтому ее скорость в зоне течения, непосредственно прилегающей к твердому телу, изменяется от нуля на стенке (на поверхности) до значения скорости в ядре потока на внешней границе указанной зоны. В пограничном слое скорость

течения возрастает от нуля (прилипание к поверхности) до абсолютного значения во внешнем потоке, где трение пренебрежимо мало.

В ходе эксперимента были получены профили средней скорости и пульсаций скорости.

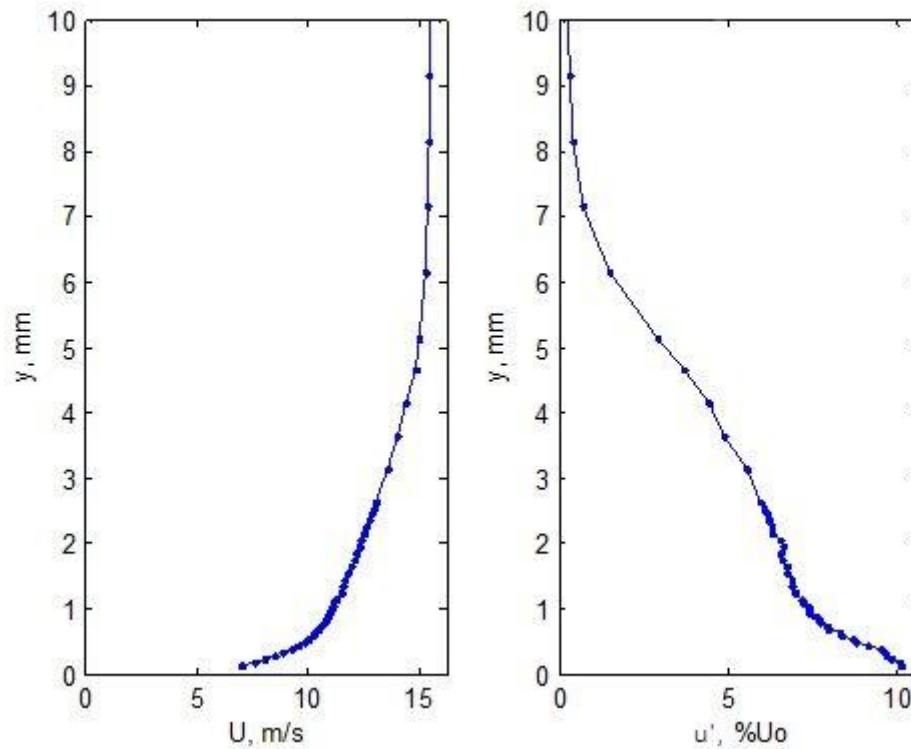


Рис.10. Без управления

Шероховатость создает в пограничном слое турбулентный след, что можно увидеть на рис.10 по характерному для турбулентного течения профилю средней скорости и пульсаций скорости. По графику изменения средней скорости (слева) можно определить толщину пограничного слоя: он заканчивается там, где перестает меняться скорость. Для точки $X = 395$ мм толщина пограничного слоя равна 7 мм.

По рис.10 (справа) видно, что максимальное значение пульсаций скорости будет вблизи стенки и оно составляет 10%.

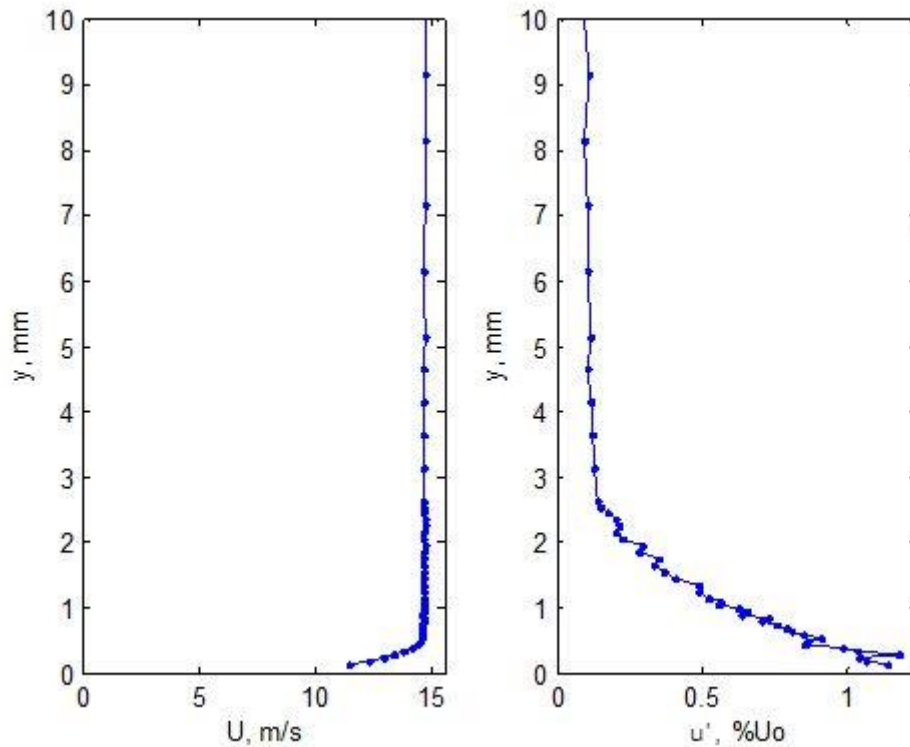


Рис.11. С управлением

Управление с помощью отсасывания пограничного слоя через перфорированную поверхность приводит к уменьшению толщины пограничного слоя (рис.11), его толщина составляет 0.5 мм. Профиль средней скорости (слева) принимает вид, характерный для ламинарного течения.

Уровень пульсаций скорости в пограничном слое после управления (рис.11, справа) уменьшился до 1.16 % (т.е. в 8.6 раз).

Выводы

По итогам выполнения данной курсовой работы был изучен принцип работы термоанемометра и была определена допустимая полоса частот пульсаций, измеряемых термоанемометром $f = 5.3$ кГц. Также были получены тарировочные коэффициенты закона Кинга, профили средней скорости и пульсаций скорости, по которым было определено, что с активным управлением пульсации скорости снизились в 8.6 раза, а характер течения за секцией отсоса вместо турбулентного стал ламинарным.

Список литературы

1. Руководство пользователя по использованию термоанемометра AN-1003;
2. Корнилов В.И. «Термоанемометрический метод определения средних и пульсационных скоростей потока». Новосибирск: 1986;