

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Бахарев Георгий Юрьевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Основы термоанемометрического метода и его применение для
исследования возмущений на прямом крыле**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18345

Научный руководитель:

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019 г.

Оглавление

Преподаватель практикума.....	1
1. Введение	3
2. Теоретическая часть	4
2.1. Конструкция и устройство датчика	4
2.2. Принцип работы термоанемометра	4
2.3. Закон Кинга	6
3. Экспериментальная часть	9
3.1. Тарировка термоанемометра	9
3.2. Схема установки и полученные результаты	13
4. Заключение	16
Список литературы	17
Приложение 1	18
Приложение 2	18

1. Введение

Данная работа посвящена изучению термоанемометрического метода измерения скорости течения в пограничном слое над прямым крылом, а также рассмотрению устройства термоанемометра постоянного сопротивления (ТПС). Термоанемометр является в настоящее время основным инструментом для изучения физической структуры ламинарных и турбулентных течений.

Его основные достоинства:

1. Возможность измерения «мгновенной» скорости (а значит и пульсаций скорости)
2. Широкий частотный диапазон измерений скорости
3. Высокая чувствительность при очень низких скоростях (менее 0.5 м/с)

Его недостатки:

1. Датчик термоанемометра вносит возмущения в исследуемое течение
2. Чувствителен к загрязнению потока (пыль, дым, пар)
3. Необходимость частой калибровки

Изучаемая среда, называемая пограничным слоем, это слой трения на поверхности обтекаемого тела, в котором присутствует эффект вязкости.

Основная цель данной работы – это изучение принципа работы термоанемометра, тарировка и определение предела чувствительности к высоким частотам его датчика, а также обработка и анализ средних и пульсационных характеристик продольной компоненты вектора скорости, полученных с помощью одноточечного датчика термоанемометра, в различных частях пограничного слоя.

2. Теоретическая часть

2.1. Конструкция и устройство датчика.

Принцип работы термоанемометра основан на изменении температуры нагретого проводника (который является датчиком), помещённого в поток. При изменении скорости потока изменяется и температура нашего проводника. Этим Проводником является чувствительный элемент термоанемометра, который представляет собой тонкую нить.

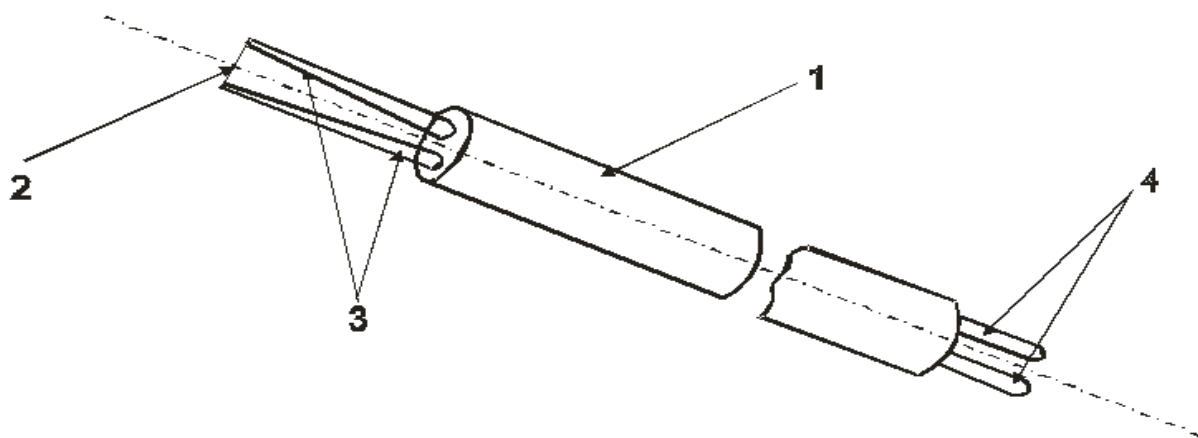


Рис 1. Конструкция датчика: 1-корпус; 2-нагреваемая нить; 3-держатели; 4-токоподводы.

В данном эксперименте использовался вид датчика, показанный на рис.1.

Стоит отметить, что диаметр d нити много меньше её длины и равен порядка 10^{-6} м. Чаще всего чувствительная нить делается из вольфрама или платины, так как она подвергается высоким температурам: от 200 до 400 °С.

Принцип работы датчика предельно прост: нить разогревается электрическим током до какой-то начальной температуры T_0 , потом нить помещается в поток газа или жидкости, где её температура понижается и, следовательно, уменьшается её сопротивление. Как раз по изменению подаваемого на нить тока получают данные.

2.2. Принцип работы термоанемометра

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

Принцип работы термоанемометров постоянного тока таков: во время эксперимента в цепи поддерживается постоянная сила тока. По изменению сопротивления датчика можно получить скорость в измеряемом потоке. Постоянный ток в цепи обеспечивается подключением нити датчика в электрическую цепь последовательно с батареей и реостатом (рис. 2).

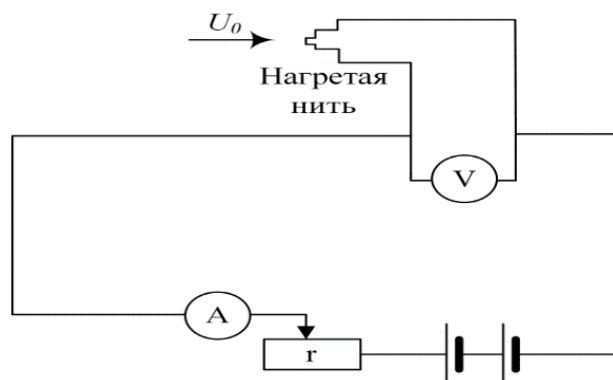


Рис.2. Схема термоанемометра постоянного тока

Разностью потенциалов на концах нити определяется её сопротивление. Разность потенциалов измеряется вольтметром, который включён в цепь параллельно.

Теперь рассмотрим устройство термоанемометра постоянного сопротивления, который и был использован в моей работе.

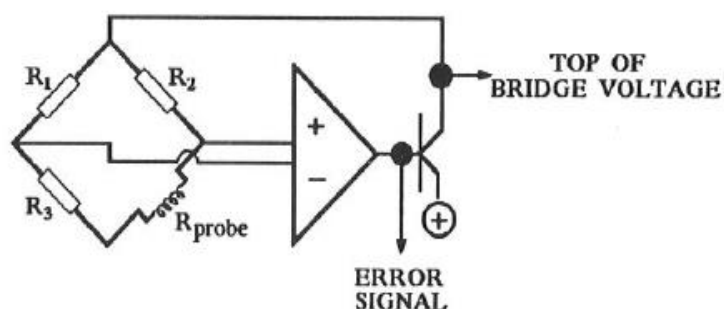


Рис. 3. Схема операционного усилителя термоанемометра постоянного сопротивления

В этом термоанемометре нить подключается в одно из плеч моста Уинстона (рис. 3). Остальные плечи моста Уинстона делаются из материала,

температурный коэффициент которого близок к нулю, чтобы баланс моста мог быть изменён только меняющимся сопротивлением нити датчика.

Принцип работы таков: при изменении скорости в потоке изменяется сопротивление нити, что вызывает разбалансировку моста Уинстона. Когда мост разбалансирован по его диагонали начинает течь ток, который требуется для поддержания постоянной температуры нити и, следовательно, её сопротивления. В данном методе измеряемым параметром является величина силы тока нити (или напряжения в моём случае), которое требуется для поддержания баланса моста.

2.3. Закон Кинга

В нашем эксперименте нить датчика термоанемометра можно рассматривать как цилиндр, обтекаемый потоками воздуха в поперечном направлении. Появляется проблема переноса тепла однородно нагретого цилиндра, теоретическое решение которой было предложено Кингом.

Экспериментально установлено, что для воздуха при поперечном обтекании длинного цилиндра в диапазоне чисел Рейнольдса $0.01 < Re < 10^4$, безразмерный параметр теплоотдачи Nu (число Нуссельта) связан с числом Re следующим образом:

$$N = 0,42 \cdot Pr^{0,2} + 0,57 \cdot Pr^{0,33} \cdot Re^{0,5} \quad (1)$$

Где Pr – число Прандтля, характеризующее соотношение между теплоемкими и теплопроводными свойствами газа, Re – число Рейнольдса, связывающее вязкостные и кинетические параметры газа:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{k_f}; Pr = \frac{C_p \cdot \mu_f}{k_f}; Re = \frac{u \cdot d}{\mu_f}$$

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 среды (в нашем случае воздуха).

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

$$Q_H = \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot (\theta_w - \theta_g) \quad (2)$$

Выражая α из уравнения для числа Нуссельта: $\alpha = \frac{Nu \cdot k_f}{d}$ получаем, что

$$Q_H = k_f \cdot \pi \cdot l \cdot (\theta_w - \theta_g) \cdot Nu \quad (3)$$

Также при условии теплового равновесия тепловые потери будут компенсироваться теплом, выделяемым электрическим током в единицу времени:

$$Q_H = \frac{E^2}{R_w} \quad (4)$$

Где R_w – сопротивление нити;

Теперь запишем зависимость сопротивления нити от температуры:

$$R_w = R_0 \cdot [1 + b \cdot (\theta_w - \theta_g)] \quad (5)$$

Где b – температурный коэффициент материала, из которого сделана нить.

Теперь приравняем выражения (3) и (4), а также выражая перепад температур $(\theta_w - \theta_g)$ из формулы (5) на перепад сопротивлений, получим следующее выражение:

$$E^2 = A + B \cdot \sqrt{u} \quad (6)$$

Выражение (6) называется законом Кинга, оно связывает падение напряжения на нити датчика со скоростью обтекающего нить потока.

Константы А и В выражаются таким образом:

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

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

Также стоит отметить, что в нашем случае $R_w = const$, так как в нашем эксперименте используется термоанемометр постоянного сопротивления.

Для термоанемометра постоянного тока скорость определяется по формуле:

$$\frac{I^2 \cdot R_w}{R_w - R_g} = A_1 + B_1 \cdot \sqrt{u}; \quad (7)$$

Которая была получена из формулы (4), с использованием $E = I \cdot R_w$, где

$$A_1 = \frac{A}{(R_w - R_g) \cdot R_w};$$

$$B_1 = \frac{B}{(R_w - R_g) \cdot R_w};$$

Из формулы (4) видно, что зависимость E и u не является линейной, но при малой интенсивности колебаний скорости $u' \equiv \Delta u \ll u$, и соответственно малой интенсивности колебаний напряжения $e' \equiv \Delta E \ll E$, легко получить приближенную связь u' с e' и E практически широко применяемую до амплитуд пульсаций $\frac{u'}{u} \approx 0,1 \div 0,6$.

Разлагая (6) в ряд по малым параметрам $\Delta u = u'$ (правую часть) и $\Delta E = e'$ (левую часть), и ограничившись первым членом разложения, получаем:

$$\Delta(E^2) \approx \frac{d(E^2)}{dE} \cdot \Delta E = 2 \cdot E \cdot e'; \quad \Delta(A + B \cdot \sqrt{u}) \approx \frac{d(A+B \cdot \sqrt{u})}{dU} \cdot \Delta u$$

откуда, заменяя $\sqrt{u}$ с помощью (6) получим:

$$2 \cdot E \cdot e' = \frac{B^2 \cdot u'}{2 \cdot (E^2 - A)}$$

В итоге, выражая малую интенсивность колебаний скорости получаем:

$$u' = \frac{4 \cdot e' \cdot E \cdot (E^2 - A)}{B} \quad (8)$$

Для безразмерных величин после взятия среднеквадратичного значения и исключения B при помощи закона Кинга ($E_\infty^2 = A + B \cdot \sqrt{u_\infty}$), а также учитывая, что $e \equiv \sqrt{e'^2}$ имеем:

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{u_\infty} = \left[\frac{4 \cdot E \cdot (E^2 - A)}{(E_\infty^2 - A)^2} \right] \cdot e$$

3. Экспериментальная часть

3.1. Тарировка термоанемометра

Чтобы получить корректные данные, термоанемометр должен пройти тарировку, то есть определение величины погрешности и рабочий диапазон, путём сравнения полученных данным с данными эталонных измерительных приборов.

Тарировка термоанемометра AN-1003 производилась в аэродинамической трубе МТ–324 ИТПМ СО РАН. Размеры рабочей части составляют 200х200 мм в сечении и 700 мм в длину.

Ход тарировки: в аэродинамическую трубу был помещён датчик термоанемометра, где были получены данные скоростей в потоке воздуха, а также выходное напряжение термоанемометра.

Для тарировки термоанемометра было получено сопротивление датчика $R = 2,4$ Ом, а также был установлен коэффициент перегрева нити, который равен 1,7.

Стоит отметить, что термоанемометр очень чувствительный прибор, так как даже незначительные помехи могут довольно сильно повлиять на ход эксперимента, при тарировке датчика были записаны показания давления и температуры в помещении, в дальнейшем они были использованы при

вычислении нужных коэффициентов k_1 , k_2 и n в модифицированном законе Кинга:

$$u = k_1 \cdot (E^2 - E_0^2)^{\frac{1}{n}} + k_2 \cdot \sqrt{E - E_0}$$

Где u – текущая скорость потока,

k_1 , k_2 , n – коэффициенты, получаемые экспериментальным путём,

E – текущее напряжение разбалансировки моста,

E_0 – напряжение разбалансировки моста при отсутствии потока.

Коэффициенты k_1 , k_2 , n были получены путём сравнения одновременных измерений выходного напряжения термоанемометра и скорости потока с помощью насадки Пито-Прандтля и электронного манометра, который является эталонным устройством, измеряющим скорость потока.

Определение коэффициентов k_1 , k_2 , n производилось в специальной программе, которая подбирает данные коэффициенты таким образом, что погрешность прибора не превышает 1%.

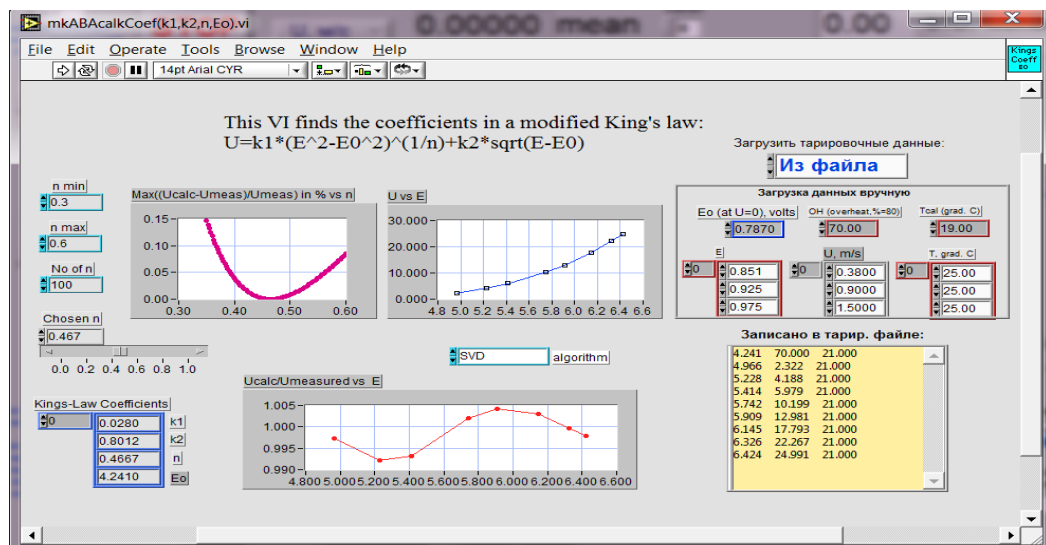


Рис.5. Окно программы.

Как можно видеть в левом нижнем углу программного окна записаны полученные коэффициенты из закона Кинга:

k_1	k_2	n	E_o
0,0280	0,8012	0,4667	4,2410

Также была получена зависимость напряжения от скорости в потоке (Табл.1), где T – температура в помещении в момент проведения тарировки.

E, В	V, м/с	T, С
4,241	0	21
4,966	2,322	21
5,228	4,188	21
5,414	5,979	21
5,742	10,199	21
5,909	12,981	21
6,145	17,793	21
6,326	22,267	21
6,424	24,991	21

Таблица 1. Зависимость напряжения моста от скорости потока.

Также стоит отметить ярко-красную кривую в нижней части окна программы. Она показывает отношение вычисляемого напряжения к измеряемому напряжению на эталонном измерительном приборе. Как можно видеть, погрешность измерений составляет менее одного процента.

Теперь перейдём к настройке рабочей полосы частот термоанемометра, чтобы она перекрывала частоту пульсаций в данной точке. Принцип настройки таков: на вход термоанемометра подаётся прямоугольный сигнал и по реакции датчика на этот сигнал определяется время отклика τ . На рис.6 можно увидеть полученную осциллограмму, на которой можно определить время отклика.

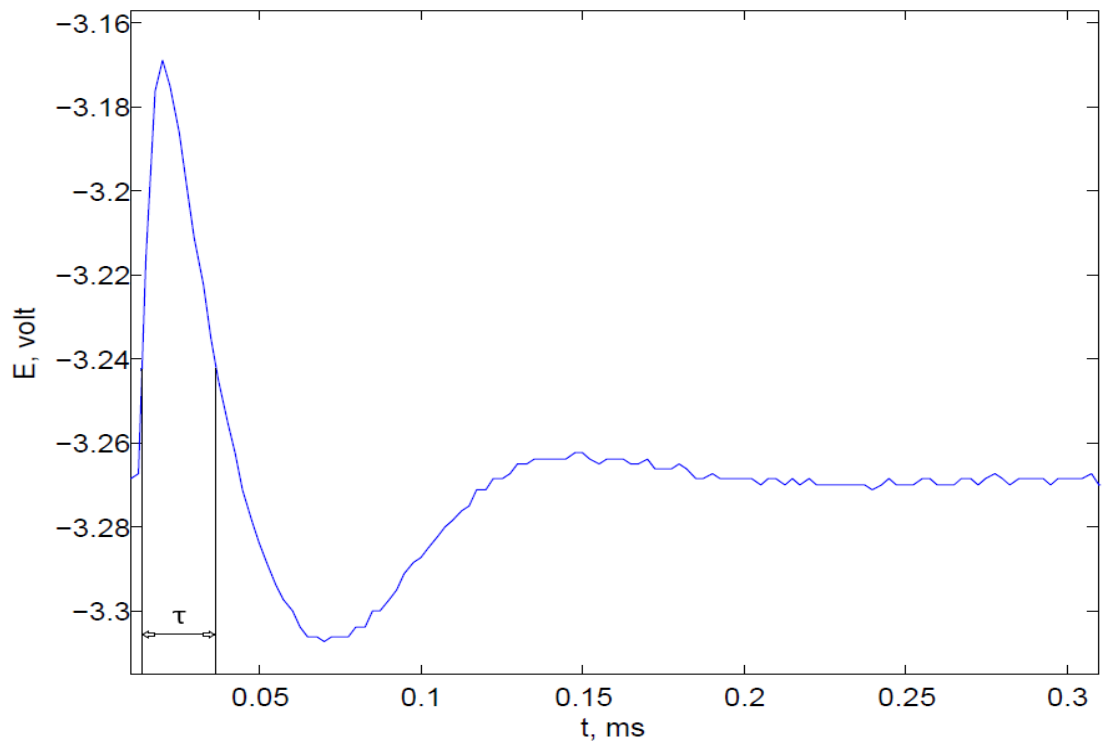


Рис.6. График отработки датчиком прямоугольного импульса

В результате полученное время задержки $\tau = 0,02 \text{ ms}$.

Получив время задержки, можно получить верхний частотный диапазон, то есть максимальную частоту, которую будет обрабатывать термоанемометр. Формула вычисления максимальной частоты для каждого прибора будет разной в силу различий в схемах и т.д. Для термоанемометра AN-1003 она вычисляется по формуле:

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

В результате полученная максимальная частота $F = 8 \text{ кГц}$

3.2. Схема установки и полученные результаты

Эксперимент проводился в аэродинамической трубе МТ-324 ИТПМ СО РАН. Схема установки представлена на рисунке 7. В данном эксперименте прямое крыло, расположенное под углом атаки $\alpha = -6^\circ$, обдувается потоком воздуха со скоростью $U_{\text{натек}} = 12,5$ м/с.

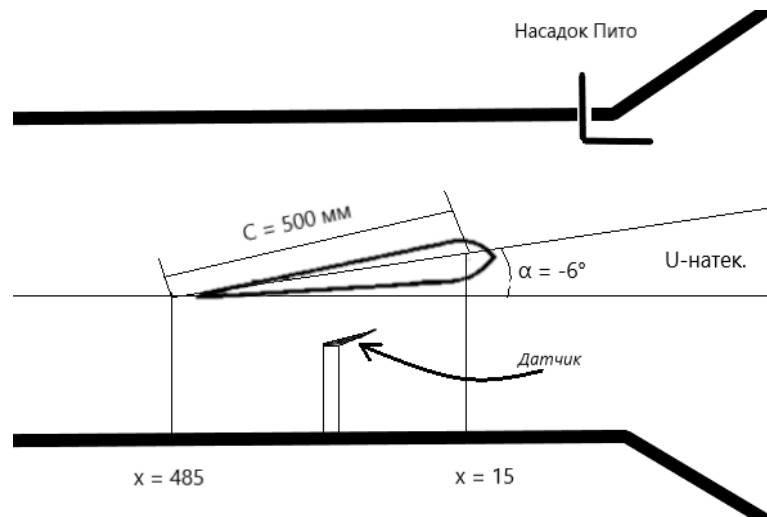


Рис.7. Схема установки

Дадим краткое определение пограничному слою. Если представить, что при течении жидкости или газа вдоль какой-то поверхности будет отсутствовать прилипание к этой поверхности, то можно сказать, что линии тока в потоке будут идентичными, как вблизи поверхности, так и вдали от неё. Но прилипание всегда имеет место быть, поэтому некоторое количество слоёв, которые расположены вблизи поверхности будут замедляться из-за трения. Совокупность этих слоёв и называется пограничным слоем. В нем скорость течения возрастает от нуля (прилипание к поверхности) до абсолютного значения во внешнем потоке, где трение незначительно.

После проведения эксперимента были получены графики распределения среднего значения скорости над прямым крылом вне пограничного слоя, а также получены распределения средних скоростей внутри пограничного слоя в разных частях плоского крыла и графики пульсаций скорости (то есть среднее отклонение). На рисунке 8 можно видеть распределение скорости над крылом

вне пограничного слоя. Характерными областями графика являются области благоприятного градиента давления, то есть там, где скорость растёт; и область неблагоприятного градиента давления, то есть там, где скорость падает.

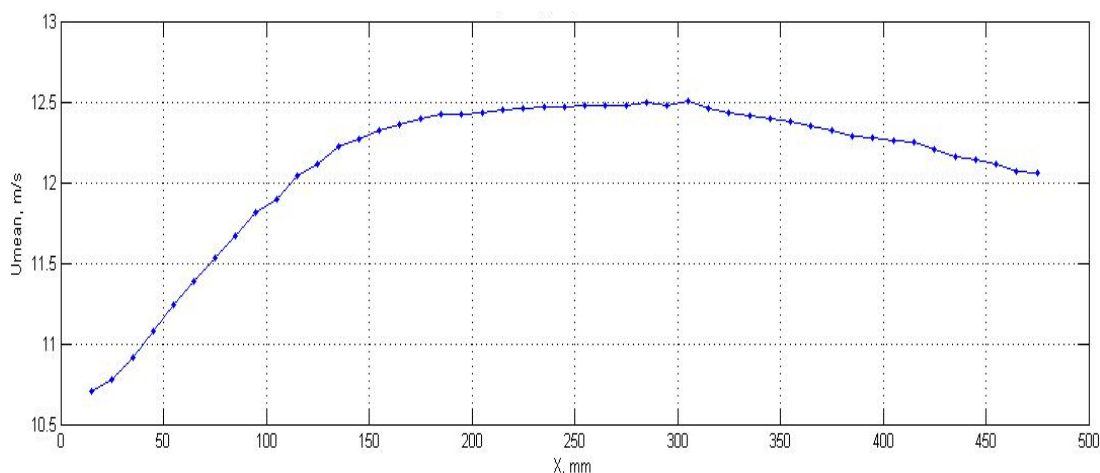


Рис.8. Распределение скорости над крылом вне пограничного слоя

На рисунке 9 можно видеть график распределения средней скорости в точке $x = 240\text{mm}$. Из данного графика можно узнать толщину пограничного слоя над плоским крылом. Там, где скорость перестаёт расти, заканчивается пограничный слой. Для точки $x = 240\text{mm}$ толщина пограничного слоя примерно 3mm .

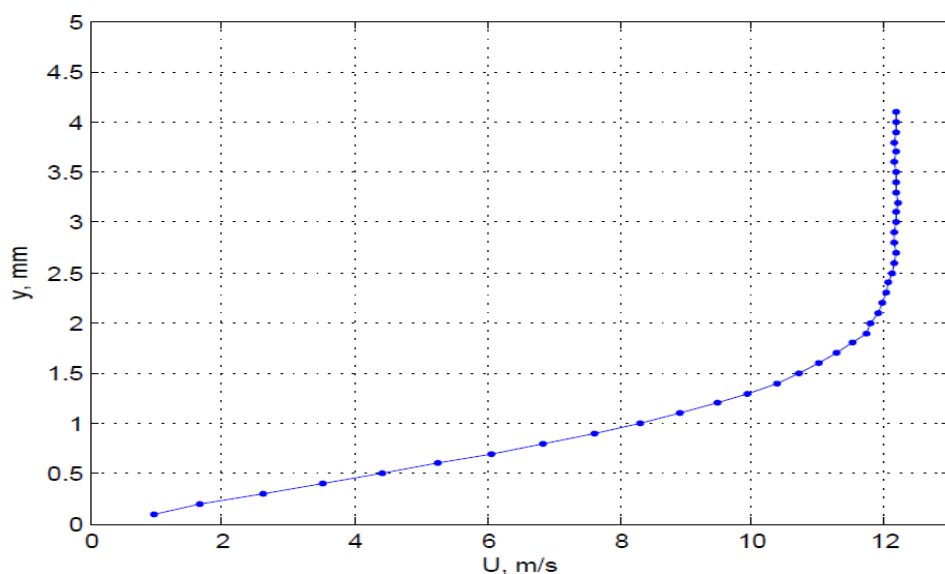


Рис.9. Распределение средней скорости внутри пограничного слоя при $x = 240\text{mm}$

Заметим, что, все распределения средних скоростей до координаты $x = 395\text{mm}$ (см. Приложение 1) при продлении графика пересекают ось y в нуле, это

говорит о том, что пограничный слой не отрывался от прямого крыла. Профиль таких скоростей называется присоединённым.

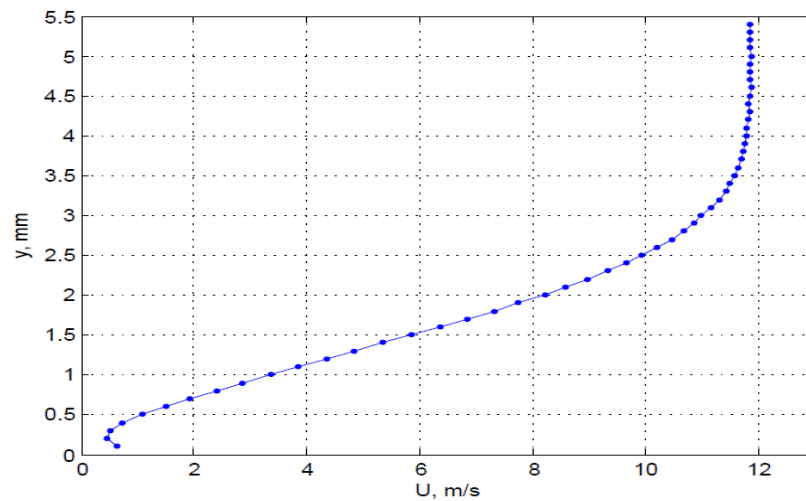


Рис.10. Распределение средней скорости в пограничном слое при $x = 435$ mm.

При рассмотрении графика распределения средней скорости для координаты $x = 435$ mm можно увидеть характерный загиб кривой, что говорит о том, что пограничный слой оторвался. Глубину отрыва можно определить, продлив кривую до пересечения с осью y (продлевать нужно часть кривой без загиба).

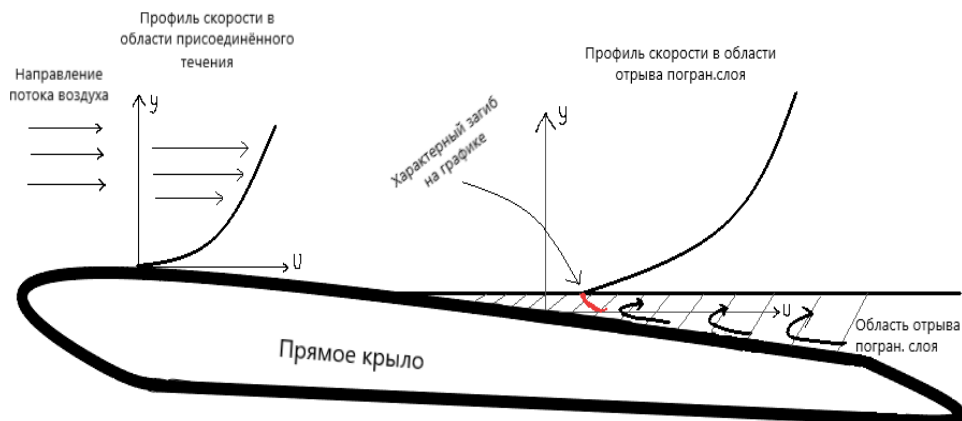


Рис.11. Профиль скорости на прямом крыле в области отрыва пограничного слоя

Также были получены графики пульсаций скорости, то есть стандартное отклонение (см. Приложение 2). По этим графикам можно понять, что величина стандартного отклонения растёт с увеличением отрыва присоединённого течения. Это происходит из-за того, что в области неблагоприятного градиента давления растут возмущения внутри пограничного слоя. На рисунке 11 область возмущений заштрихована.

4. Заключение

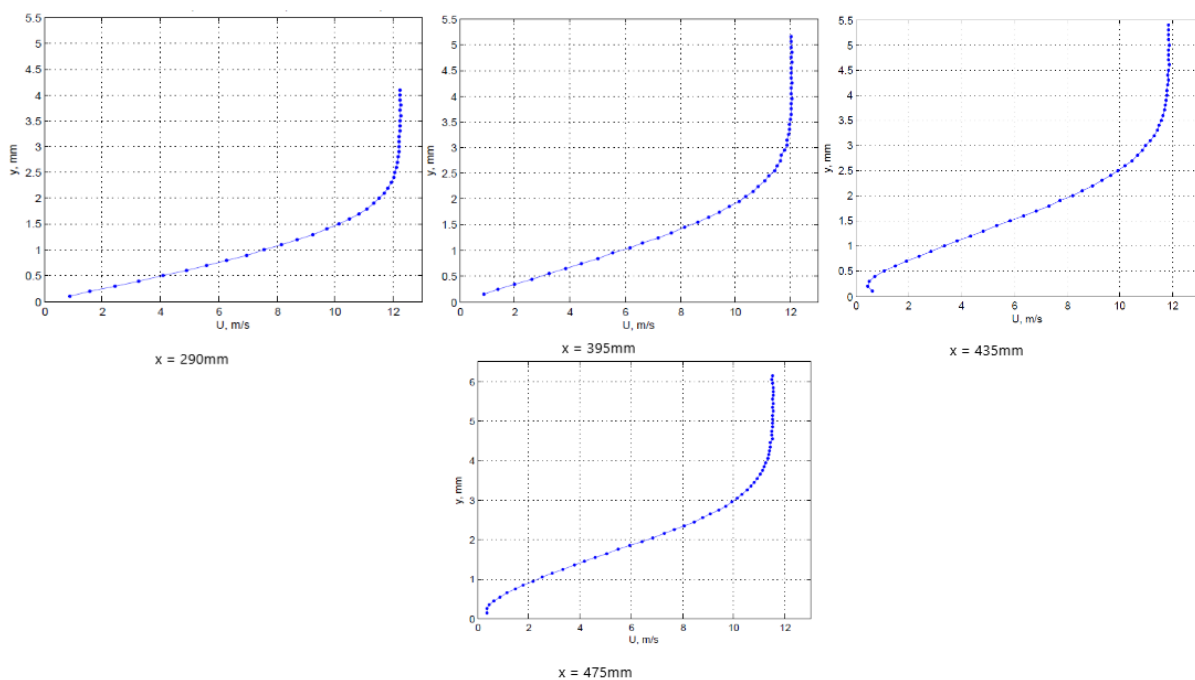
В процессе выполнения курсовой работы был изучен принцип работы термоанемометра, получены тарировочные коэффициенты в законе Кинга. Были получены графики профилей скорости в разных областях прямого крыла, обдуваемого потоком воздуха, по которым можно определить отрыв пограничного слоя. Также были получены графики стандартного отклонения скоростей в пограничном слое и получена зависимость этого отклонения от роста отрыва пограничного слоя от поверхности прямого крыла.

Список литературы

1. Корнилов В.И. Термоанемометрический метод определения средних и пульсационных скоростей потока. Новосибирск: 1986;
2. Шлихтинг. Г. Теория пограничного слоя, 1974.

Приложение 1

Графики распределения средних скоростей внутри пограничного слоя в разных частях плоского крыла



Приложение 2

Графики пульсаций скорости

