Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) Федеральный Университет»

ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ

КАФЕДРА АЭРОГИДРОМЕХАНИКИ

Направление: 010900.68 – механика и математическое моделирование

Специализация: механика жидкости, газа и плазмы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

Моделирование гидрометрического зонда в пакете FLUENT

Работа завершена:

"___"_____ 2014 г. _____ (Д.О. Тарасов)

Работа допущена к защите:

Научный руководитель,

кандидат ф.–м. наук

"___"_____ 2014 г. _____ (К.А. Поташев)

Заведующий кафедрой,

доктор ф.–м. наук, профессор

"___"_____ 2014 г. _____ (А.Г.Егоров)

Казань – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Гидрометрические трубки	4
Постановка задачи	6
Расчетная область	9
Построение решения	12
Результаты	25
Список литературы	27

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении курсовой работы на третьем курсе, посвященной изучению характеристик аэродинамического стенда ТМЖ-1М, и соответствующих измерительных приборов возникла необходимость проверки данных, предоставленных ЦАГИ. А именно проверка поправочного коэффициента, используемого для измерения скорости воздуха. Данный коэффициент предоставлен в виде константы. Целью настоящей работы является проведение вычислительного эксперимента в пакете FLUENT для расчета величины поправочного коэффициента в широком диапазоне скоростей.

ГИДРОМЕТРИЧЕСКИЕ ТРУБКИ

В гидроаэромеханике применяются измерительные трубки - устройства для измерения величины и направления скорости водных и воздушных потоков, а также относительных скоростей движения судов и самолётов и расхода жидкости или газа, основанные на определении давления в потоке.

Широко распространена комбинированная трубка Пито - Прандтля, которая представляет собой цилиндрическую трубку с полусферическим носиком (рис. 1), ось которой устанавливается вдоль потока [6;215]. Через центральное отверстие на полусфере (критическая точка) измеряется полное давление p_0, которое реализуется при изоэнтропическом торможении потока до нулевой скорости. Другое отверстие (или ряд отверстий) располагается на боковой поверхности трубки и служит для измерения статического давления p.

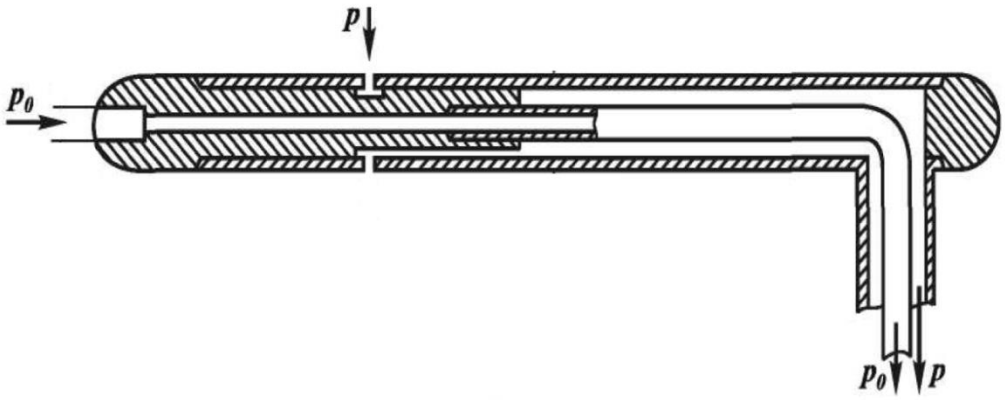


Рисунок 1. Трубка Пито – Прандтля [6;216].

Геометрическая форма трубки и форма отверстий и расстояние от них до носика трубки выбираются так, чтобы давление в боковых отверстиях по возможности мало отличалось от статического давления в исследуемой точке потока. Небольшое несоответствие давлений учитывается поправочным коэффициентом ψ, который определяют калибровкой. Зная p и p_0, вычисляют скорость потока $V = \sqrt{\frac{2}{\rho}\psi(p_0 - p)}$.

Для измерения скорости потока существует множество модификаций трубки Пито - Прандтля (трубки Брабе, Лосиевского, Престона и др. [6;217]), кроме того, скорость определяют Вентури трубкой. Направление потока измеряют цилиндрическими и сферическими насадками, комбинациями из трёх расположенных под углом друг к другу трубок Пито и т. д., показания которых очень чувствительны к направлению потока.

Для исследования полей скоростей в пограничном слое потока вязкой жидкости или газа вблизи твердой стенки применяется трубка Стэнтона, измеряющая скоростной напор в потоке с большим вертикальным градиентом скорости (рис. 2); она устанавливается непосредственно на поверхности обтекаемого тела и перемещается по вертикали микрометрическим винтом. Измеренное трубкой давление относится к эффективному расстоянию от стенки, определяемому из калибровки. Скорость вычисляют по разности полного давления, измеренного трубкой, и статического давления на стенке канала.

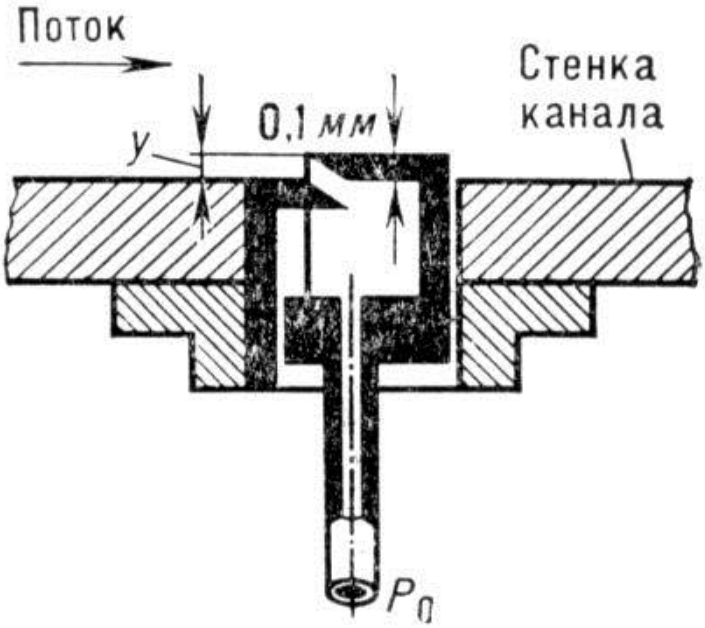


Рисунок 2. Трубка Стэнтона.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследования является цилиндрическая гидрометрическая трубка (зонд), принцип действия которой аналогичен трубке Пито – Прандтля. Форма зонда обусловлена удобством его размещения внутри модулей, через которые проходит поток воздуха. Приемные отверстия выполнены в противоположных сторонах сечения трубки, центральная ось которой располагается вдоль вектора скорости набегающего потока (рис. 3) вид сбоку, (рис. 4) вид спереди. Поперечное сечение зонда в трубе изображено на рис. 5.

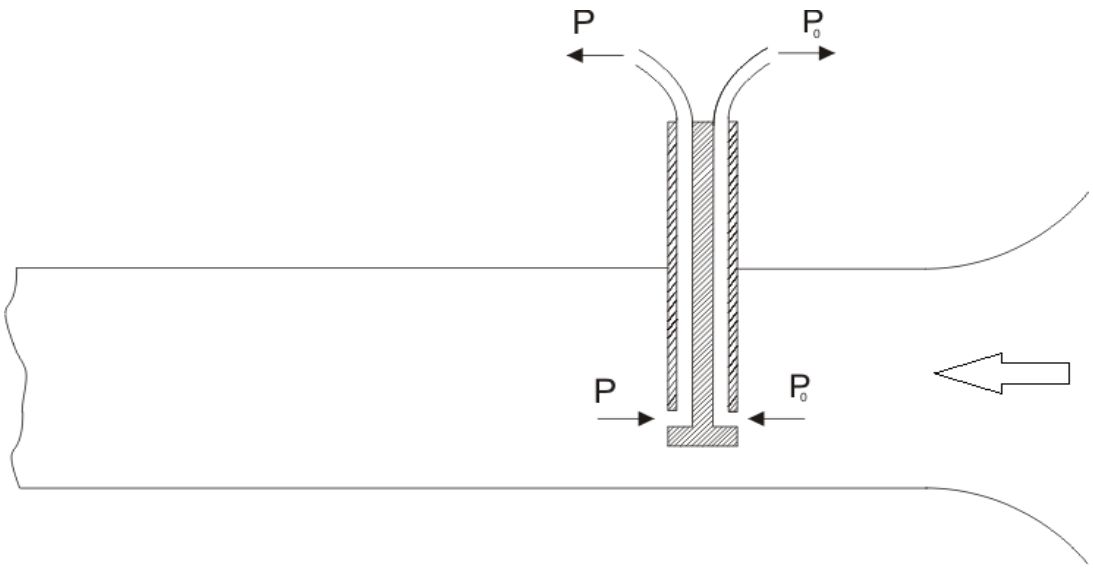


Рисунок 3. Схема размещения зонда в модуле (вид сбоку).

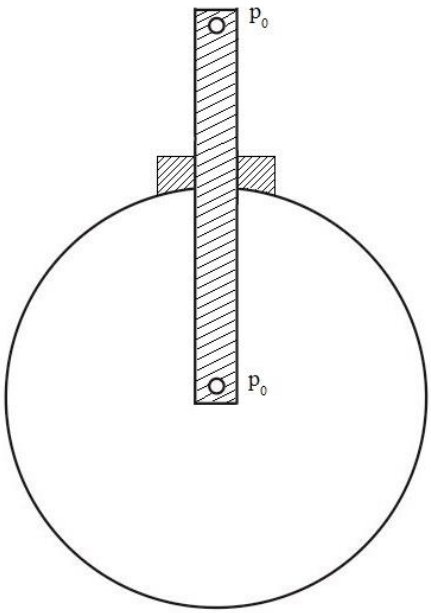


Рисунок 4. Схема размещения зонда в модуле (вид спереди).

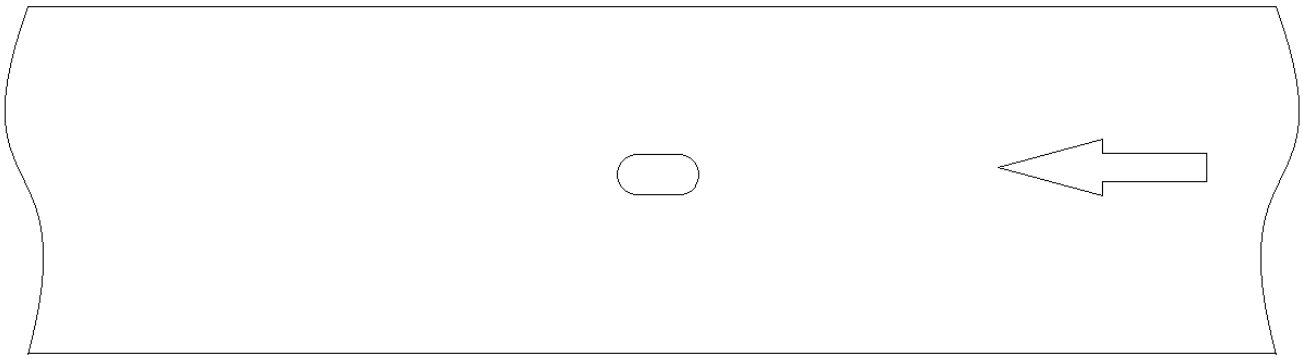


Рисунок 5 Поперечное сечение зонда в трубе

Зонд помещается в специальное отверстие в трубе, а приемные отверстия зонда подключаются к микроманометру, тем самым вычисляется разница полного и статического давления $\Delta p = (p_0 - p)$. Величина скоростного напора в исследуемой точке потока вычисляется по формуле:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}\Psi\Delta p}. \qquad (1)$$

Методом численного моделирования требуется оценить значения поправочного коэффициента ψ для зонда известного поперечного сечения при различных скоростях набегающего потока. В качестве сравнения используются величины поправочных коэффициентов, предоставленные в актах калибровки зондов, выполненных в ЦАГИ (табл. 1).

Для простоты задачу будем решать в двумерной постановке – для случая обтекания бесконечного цилиндрического зонда между двумя плоскостями.

Таблица 1. Значения поправочного коэффициента зондов

Номер зонда	Поправочный коэффициент ψ
78	0.77
79	0.61
80	0.56

РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ

Строилась двумерная симметричная относительно центральной плоскости задача. Положение и геометрия поперечного сечения зонда задавались в среде GAMBIT и показаны на рис. 6. Граничные условия показаны на рис. 7.

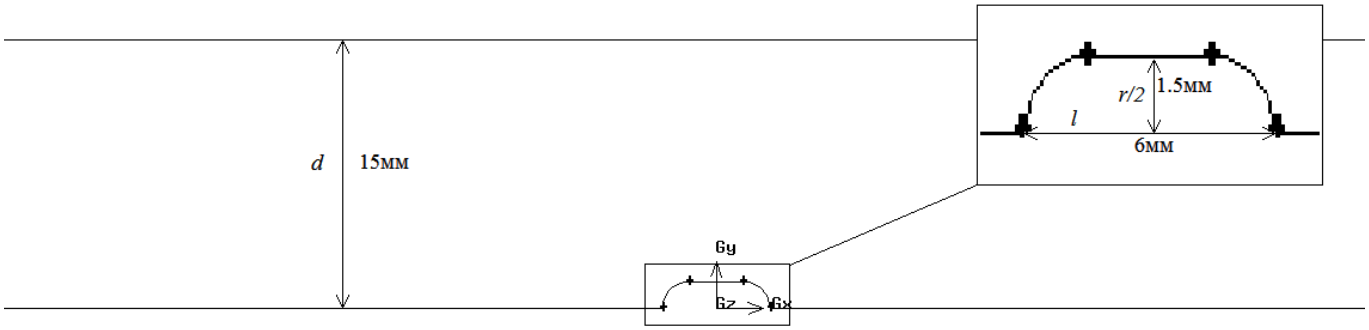


Рисунок 6. Положение и геометрия поперечного сечения зонда

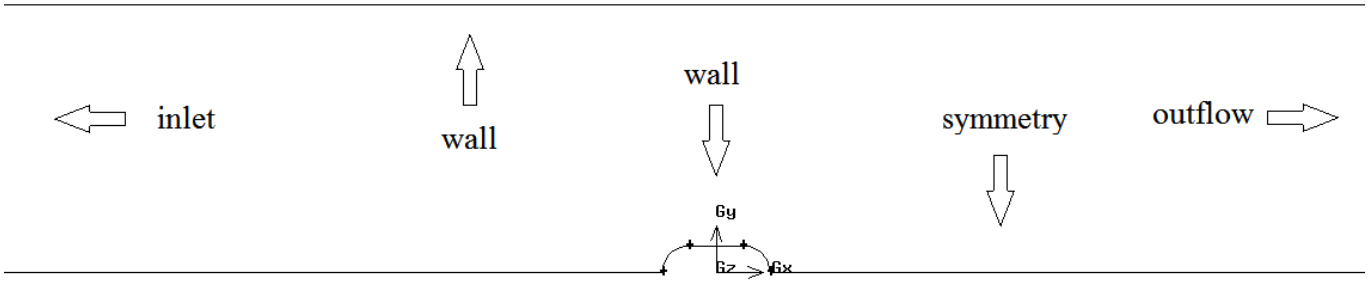


Рисунок 7. Граничные условия.

Для наиболее оптимального разбиения сетки была исследована сходимость решения для различных шагов.

Из Рис. 8 видно, что расчеты можно проводить на сетке, построенной с шагом h = 0.0003.

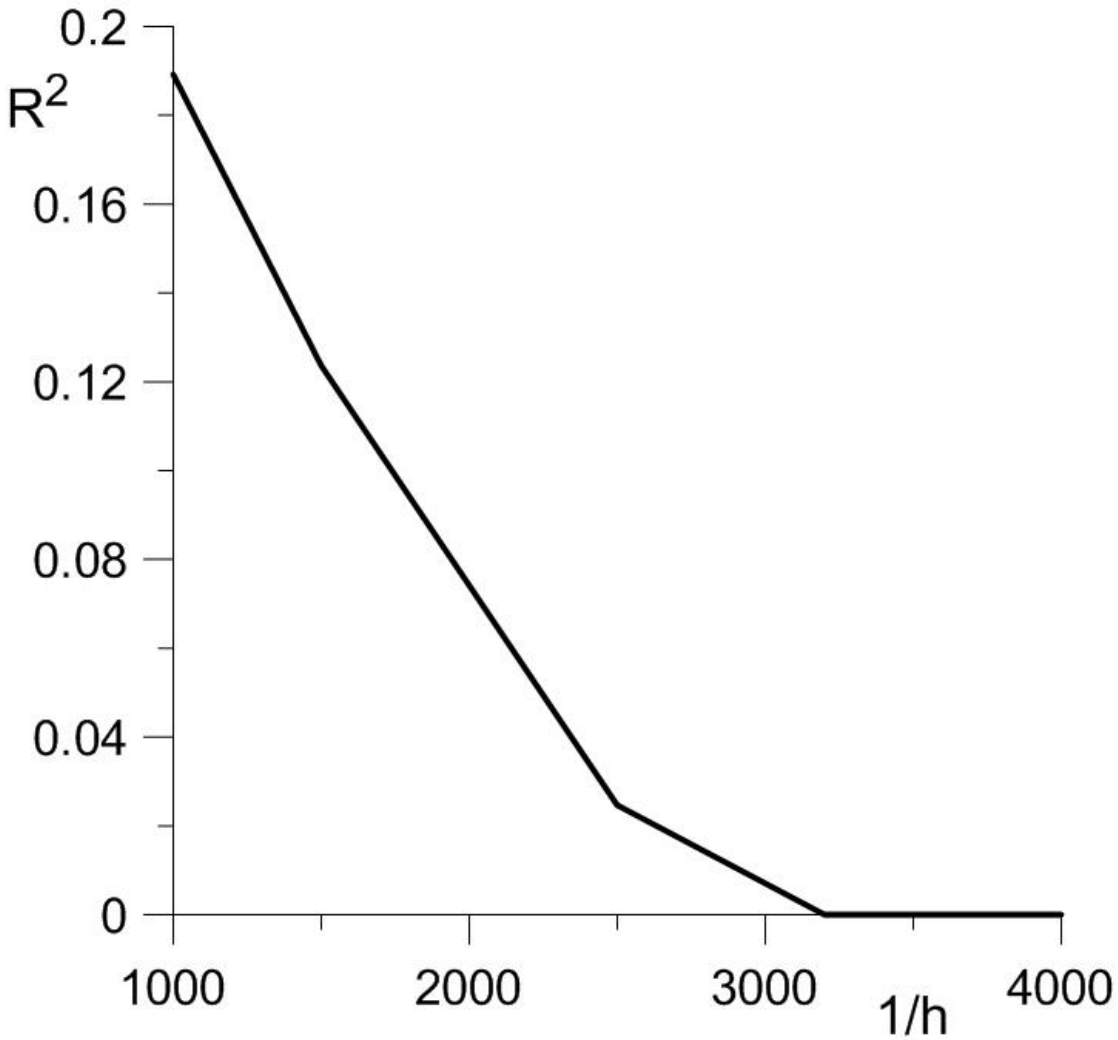


Рисунок 8. Сходимость решения при измельчении шага сетки

Для решения использовалась треугольная сетка из 129248 узлов (рис. 9). Вдоль поверхности зонда задавалось сгущение расчетной сетки типа «пограничный слой».

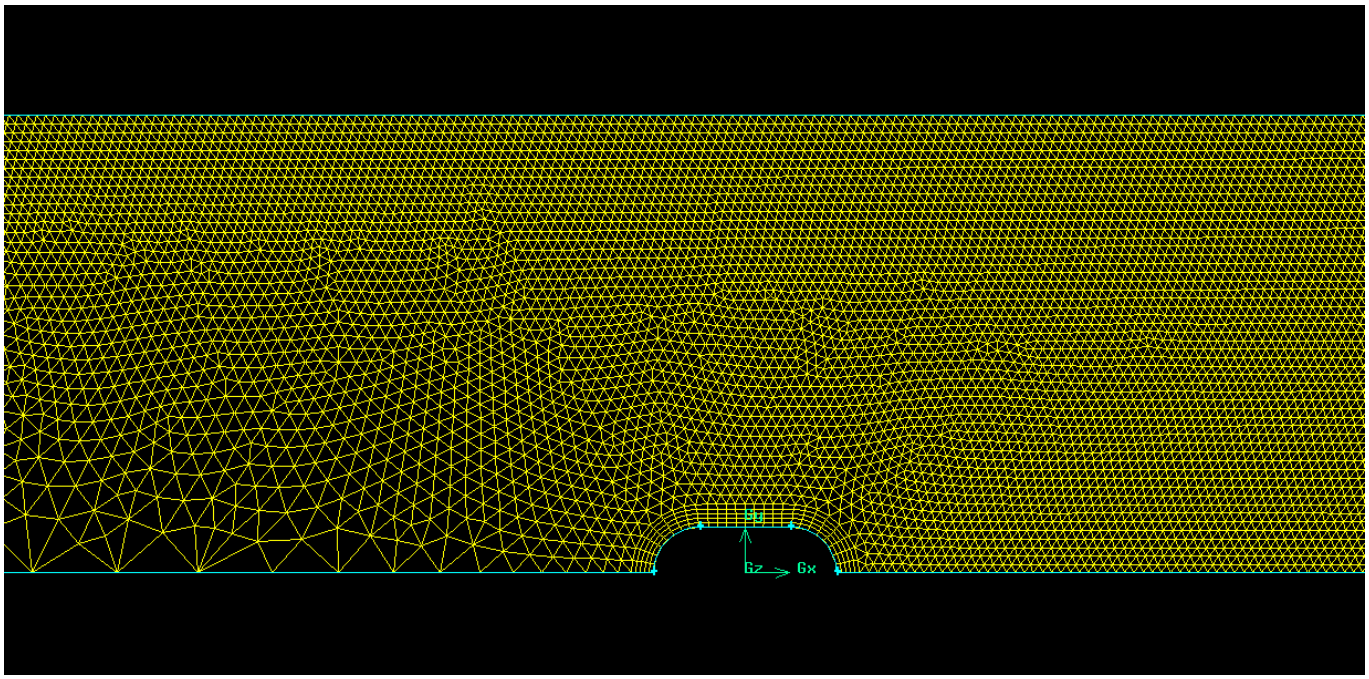


Рисунок 9. Схема сетки.

Для построения численного решения задачи использовалось три модели течения: Laminar, K – Epsilon, Spalart – Allmaras. Список моделируемых режимов течения и соответствующих моделей приведен в табл. 2. Приведенные в таблице числа Рейнольдса вычислялись следующим образом

$$\mathrm{Re}_d = \frac{V\,d}{\eta}, \quad \mathrm{Re}_l = \frac{V\,l}{\eta}, \quad \mathrm{Re}_r = \frac{V\,r}{\eta}.$$

Таблица 2 Список моделируемых режимов и используемых моделей

Laminar				K - Epsilon				Spalart - Allmaras			
Re_d	Re_l	Re_r	V м/с	Re_d	Re_l	Re_r	V м/с	Re_d	Re_l	Re_r	V м/с
10	2	1	**0.005**	3000	600	300	**1.461**	3000	600	300	**1.461**
100	20	10	**0.05**	6000	1200	600	**2.922**	6000	1200	600	**2.922**
500	100	50	**0.244**	12000	2400	1200	**5.843**	12000	2400	1200	**5.843**
1500	300	150	**0.731**	24000	4800	2400	**11.686**	24000	4800	2400	**11.686**
3000	600	300	**1.461**	48000	9600	4800	**23.372**	48000	9600	4800	**23.372**
6000	1200	600	**2.922**	70000	14000	7000	**34.084**	70000	14000	7000	**34.084**

ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЯ

Для наиболее быстрой стабилизации расчетного поперечного профиля продольной скорости в канале до зонда на входной границе задавался не постоянный, а переменный профиль с помощью UDF-метода. Это позволяло значительно сократить вычислительные затраты за счет малой длины начального участка канала. Использовалась следующая система координат (рис 10). Форма входного профиля подбиралась в зависимости от моделируемого диапазона скоростей потока. При малых скоростях (до 1м/с) задавался профиль Пуазейля, а при высоких скоростях (более 1м/с) задавался приближенный стабилизированный профиль. На рис. 11 представлен график изменения горизонтальной составляющей $\frac{V_i}{V_0}$ вдоль оси канала от его входной границы до границы зонда при $\mathrm{Re}_d = 48000$, где V_0 - скорость на входе в канал, а V_i - последующая скорость по длине трубы.

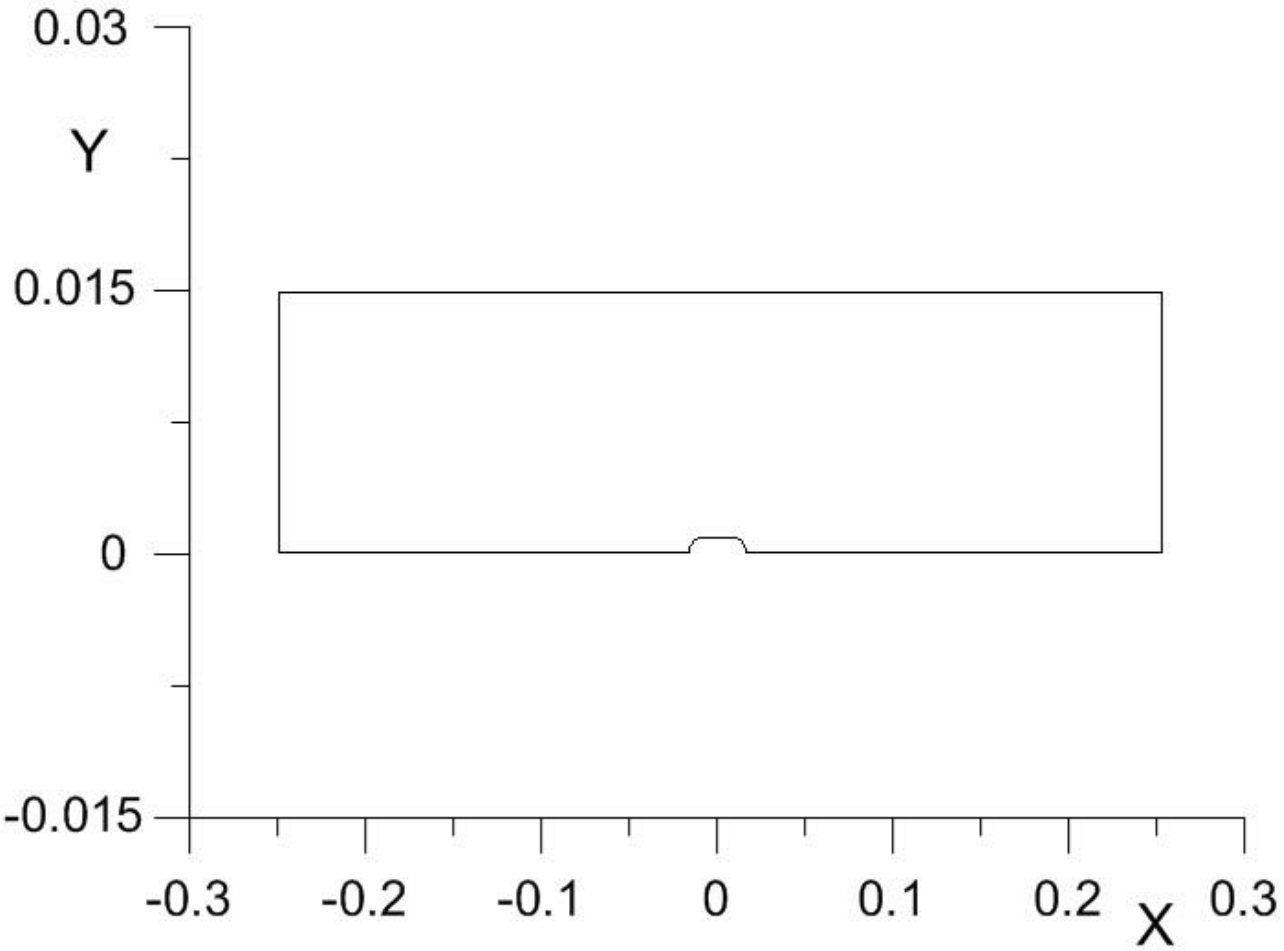


Рисунок 10. Система координат

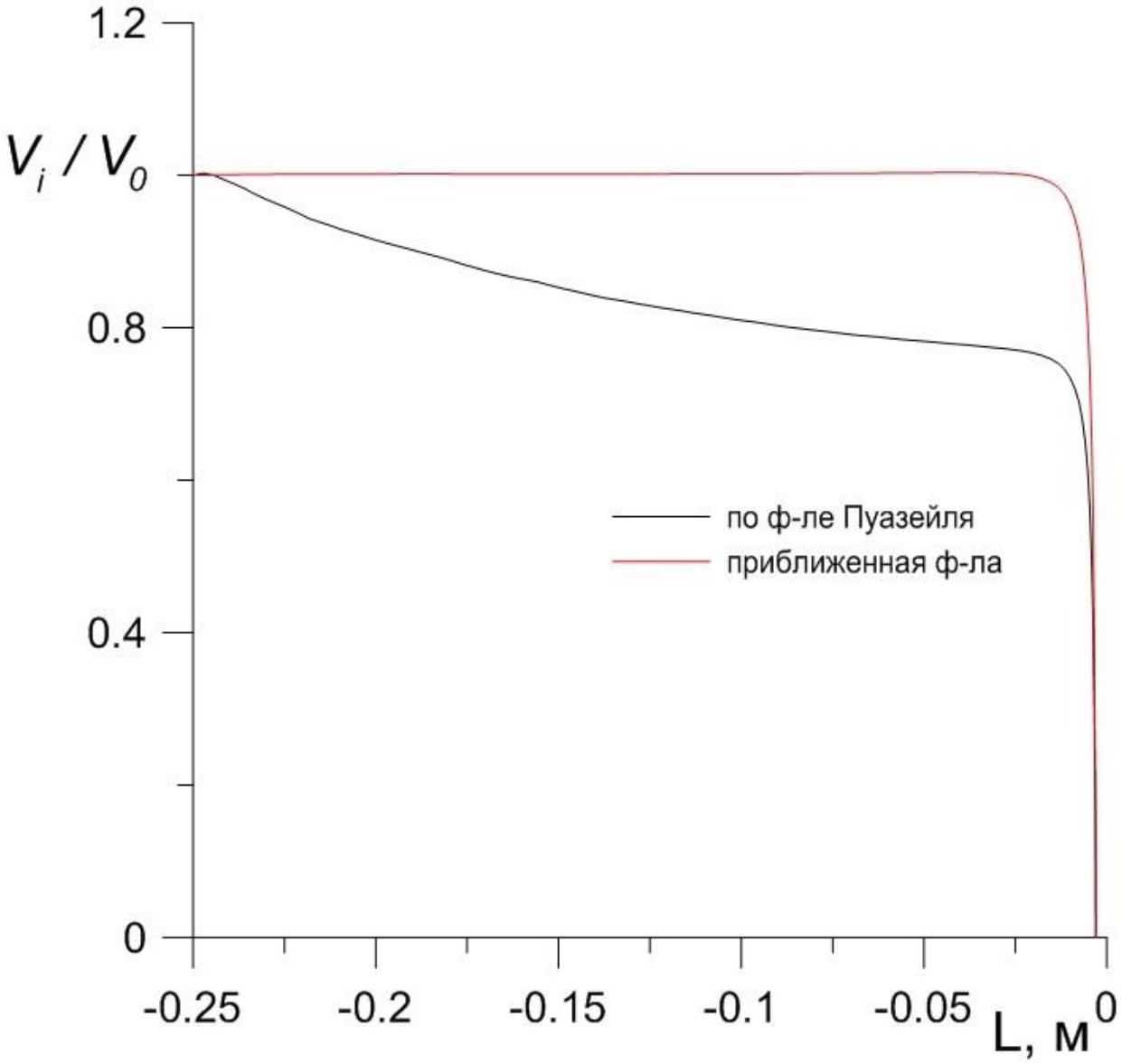


Рисунок 11. Распределение $\frac{V_i}{V_0}$ вдоль центрального сечения.

При расчетах задавалась постоянная вязкость воздуха и менялась скорость на входе, тем самым меняя число Рейнольдса. Использовались следующие параметры турбулентности для моделей K – Epsilon (рис 12) и Spalart – Allmaras (рис 13).

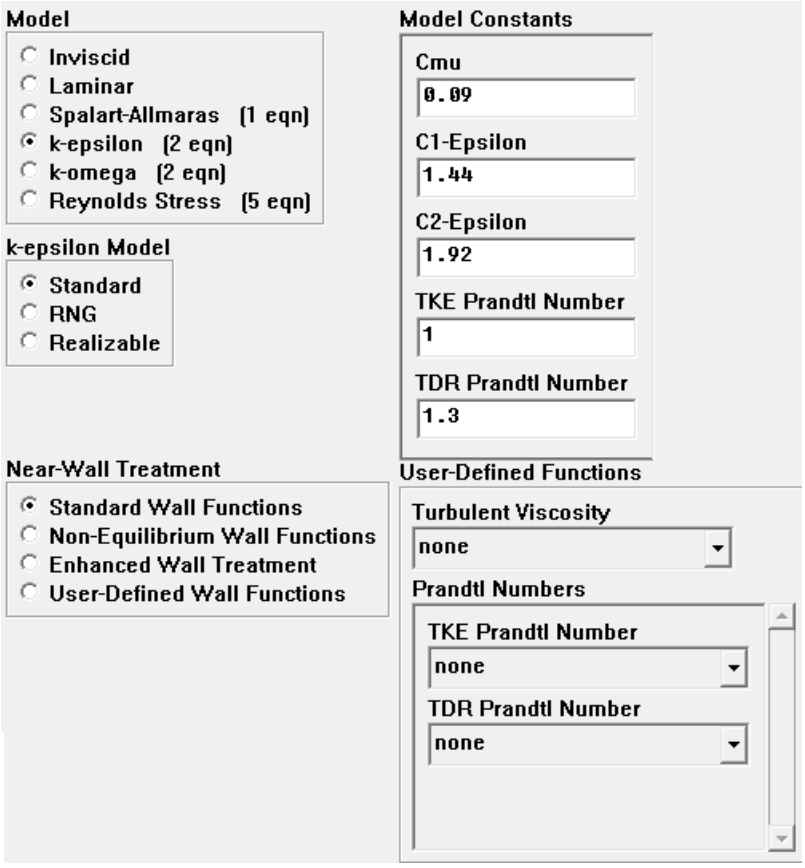


Рисунок 12. Параметры модели K – Epsilon

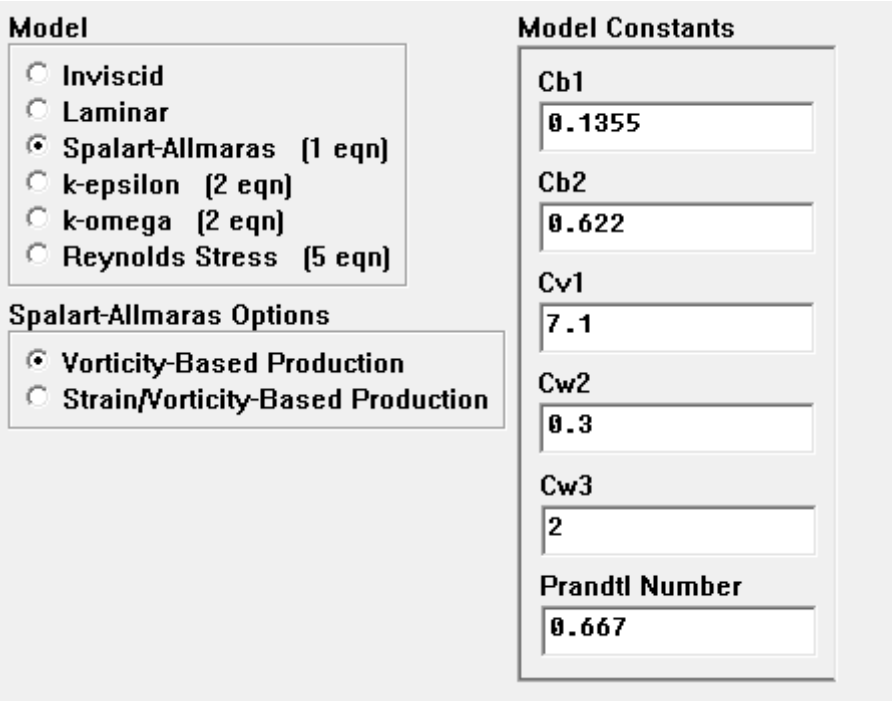


Рисунок 13. Параметры модели Spalart – Allmaras

Время одного расчета для ламинарной модели не превышало 20 минут, так же как и для турбулентной модели Spalart – Allmaras, а модель турбулентности K – Epsilon вычислялась порядка 30 минут. При конфигурации компьютера: процессор Intel Core 2 Duo T6600 2.2 GHz, оперативная память 4.00 Gb, видеокарта NVIDIA GeForce GT 320M, архитектура системы 64 – разрядная.

Для определения поправочного коэффициента ψ вычислялась разница полного и статического давления на зонде. По разнице давлений вычислялась скорость и сравнивалась со скоростью потока в невозмущенной области до зонда. Полное давление вычислялось в центральной точке зонда на встречу потоку, а статическое в центральной точке после обтекания зонда. Зависимость поправочного коэффициента ψ от числа Re_d представлен в табл. 3 и на рис 14.

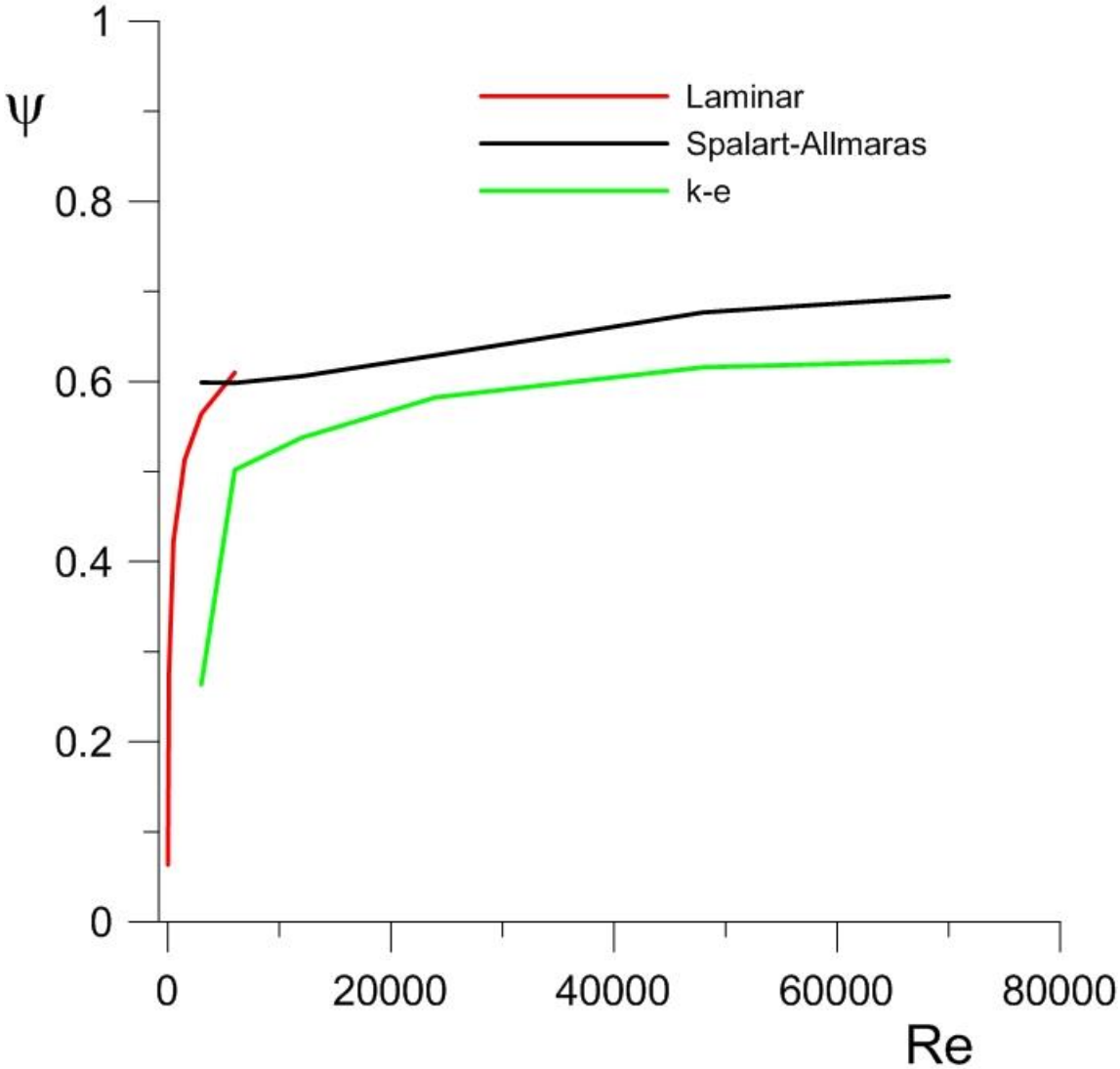


Рисунок 14. Зависимость $\psi\left(\mathrm{Re}_d\right)$

Таблица 3 Расчетные значения поправочного коэффициента для зонда

Re_d	Laminar	K - Epsilon	Spalart - Allmaras
10	0.063298648		
100	0.277024522		
500	0.423021158		
1500	0.512839945		
3000	0.564179049	0.263731	0.599031
6000	0.609833273	0.501932	0.598459
12000		0.537589	0.60594
24000		0.582407	0.629058
48000		0.615802	0.676775
70000		0.622836	0.694758

Как видно по графику, модель турбулентности Spalart – Allmaras является более подходящим продолжением ламинарного режима течения, по сравнению с моделью турбулентности k – Epsilon. Сопоставив полученные результаты поправочного коэффициента с предоставленными ψ можно заметить, что для зонда №79 при модели Spalart – Allmaras он совпадает при числах Re_d до 20000, а для зонда №78 и №80, существенно отличается.

На рис. 15 представлены расчетные линии тока по ламинарной модели при $\mathrm{Re}_d = 1500$, а на рис. 16 – 17, линии тока по моделям соответственно K – Epsilon и Spalart – Allmaras при $\mathrm{Re}_d = 48000$. Так же для объяснения совпадения поправочного коэффициента с данными ЦАГИ для зонда № 79 при $\mathrm{Re}_d = 6000$ на рис. 18 - 19 показаны линии тока, полученные по ламинарной модели и по модели Spalart – Allmaras. Для сравнения на рис. 20 представлены линии тока для модели K – Epsilon.

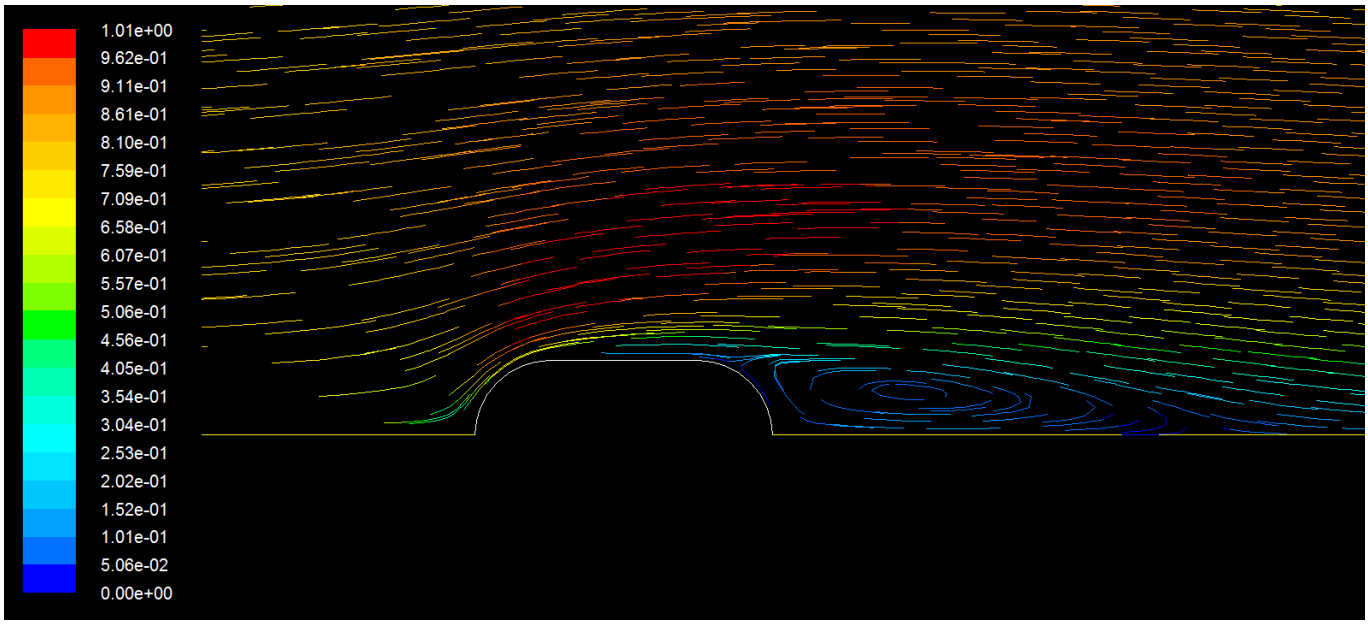


Рисунок 15. Линии тока по ламинарной модели.

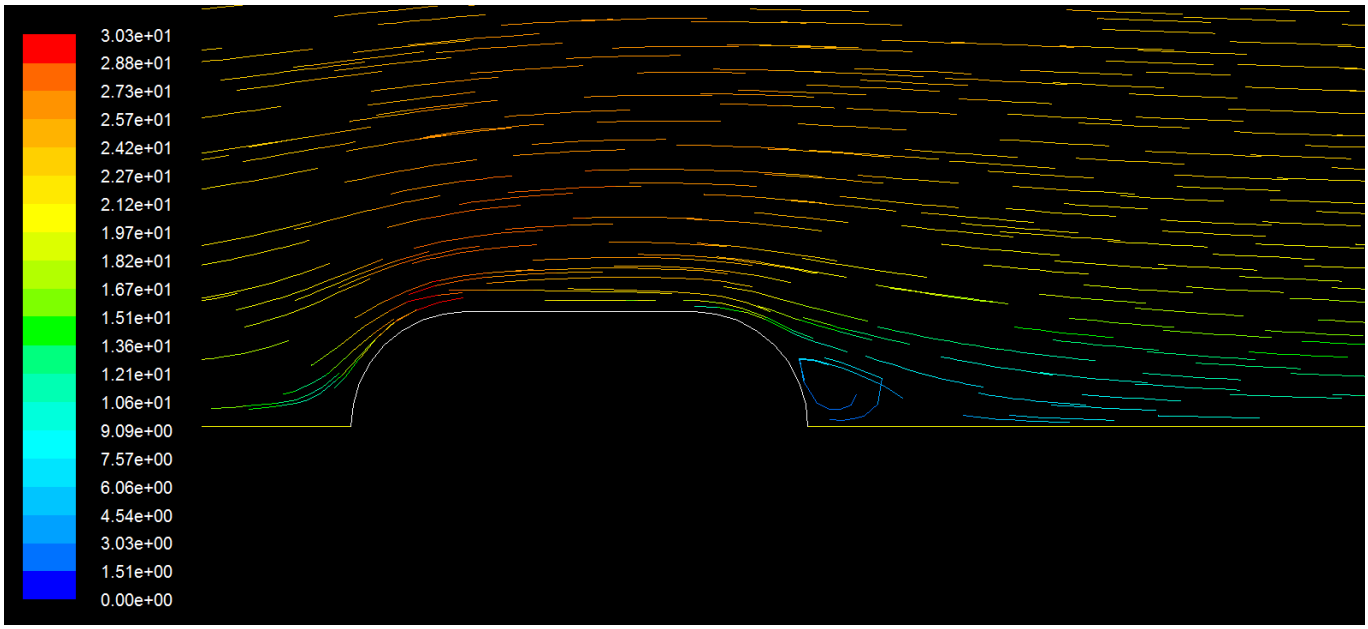


Рисунок 16. Линии тока турбулентной модели K – Epsilon.

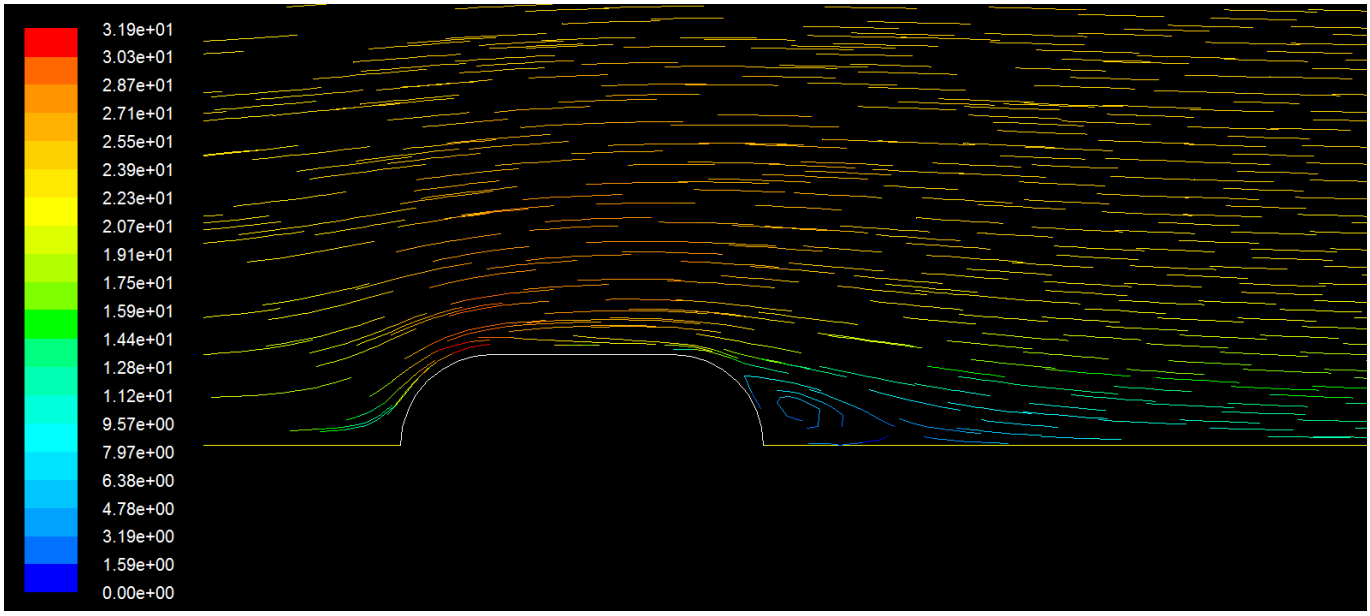


Рисунок 17. Линии тока турбулентной модели Spalart – Allmaras

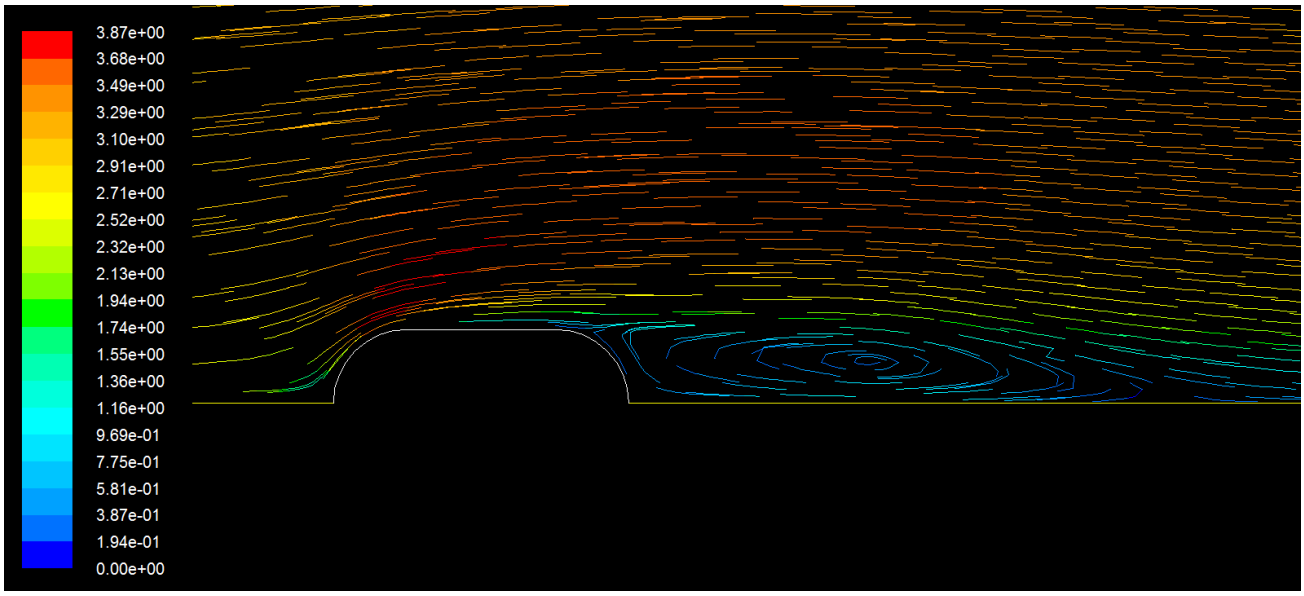


Рисунок 18 Линии тока Ламинарная модель $\mathrm{Re}_d = 6000$

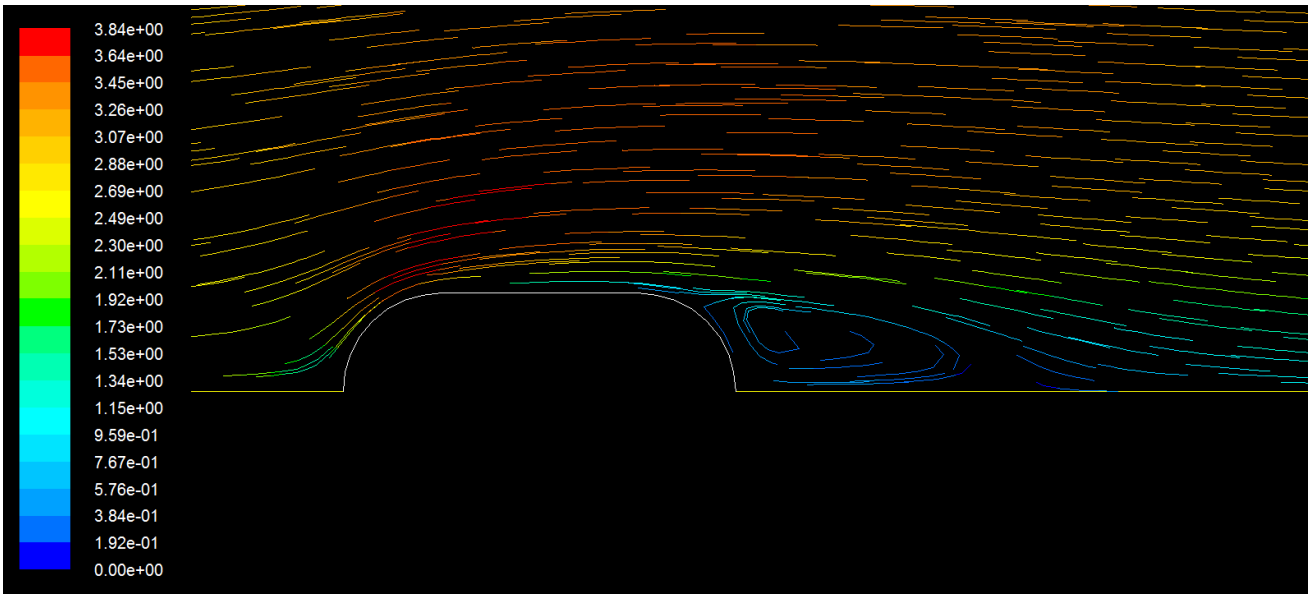


Рисунок 19. Линии тока модель Spalart – Allmaras $\mathrm{Re}_d = 6000$

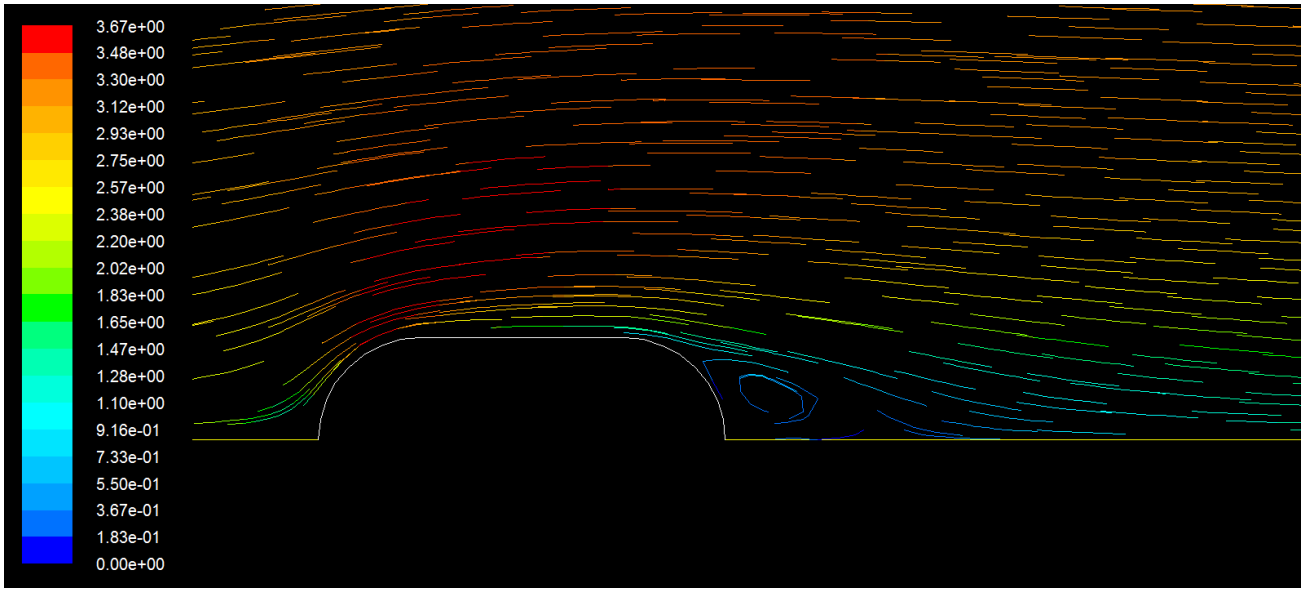


Рисунок 20. Линии тока модель K – Epsilon $\mathrm{Re}_d = 6000$

Рассмотрим распределение полного (рис 21) и статического (рис 22) давления вдоль длины зонда, при различных моделях и фиксированном числе $\mathrm{Re}_d = 6000$.

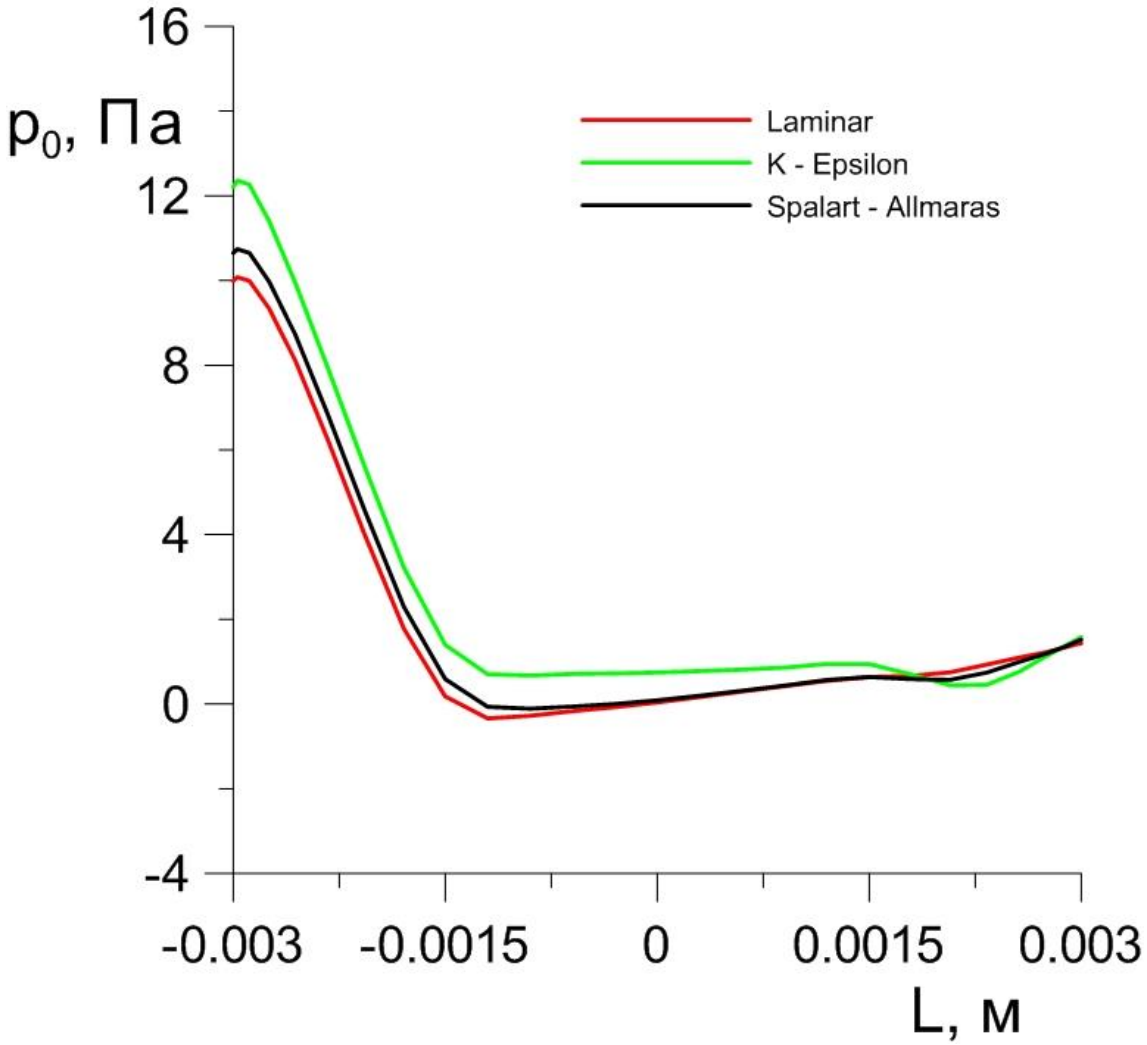


Рисунок 21. Распределение полного давления вдоль длины зонда

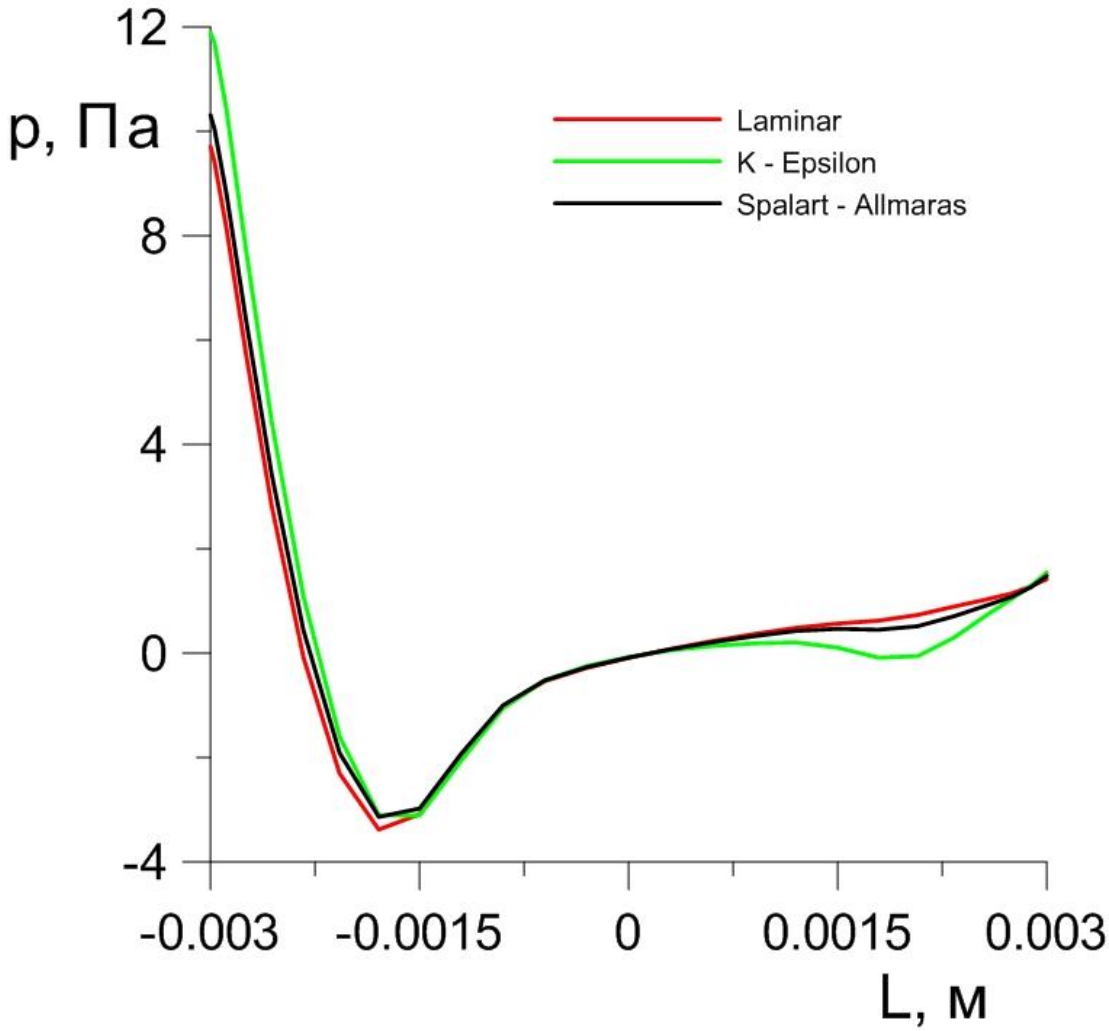


Рисунок 22. Распределение статического давления вдоль длины зонда

Влияние положения приемных отверстий на показания зонда

Рассмотрим теперь влияние отклонения положений приемных отверстий от хорды зонда на его показания. Углы отклонения отверстий со стороны набегающего потока и с противоположной стороны обозначим соответственно α и β (рис 23). Для каждой комбинации углов отклонения построим собственную кривую $\psi_{\alpha\beta}(\mathrm{Re})$ и вычислим ее среднеквадратическое отклонение от эталонной кривой $\psi|_{\alpha=0,\,\beta=0}(\mathrm{Re})$. На рис. 24 представлен график зависимости $\psi_{\alpha\beta}(\mathrm{Re})$, при фиксированном $\alpha=0$, а на рис. 25 при фиксированном $\beta=0$.

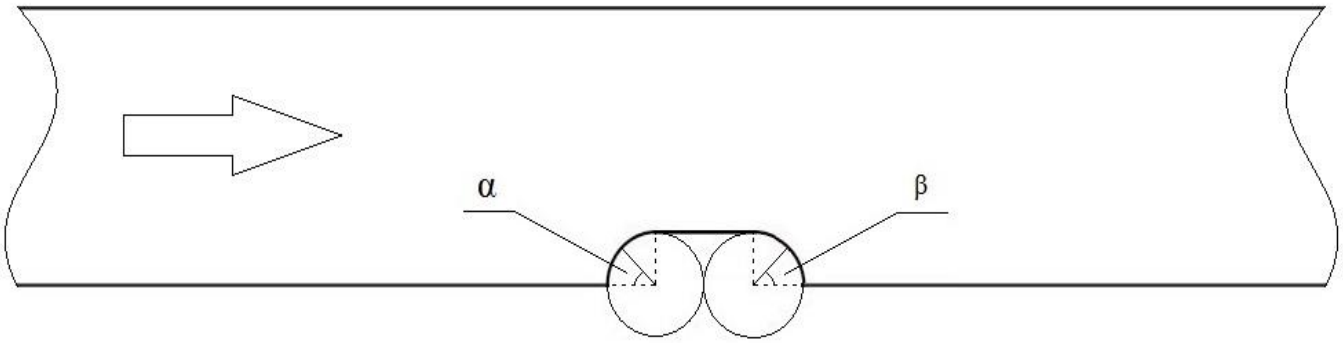


Рисунок 23. Схема смещения приемных отверстий от хорды зонда

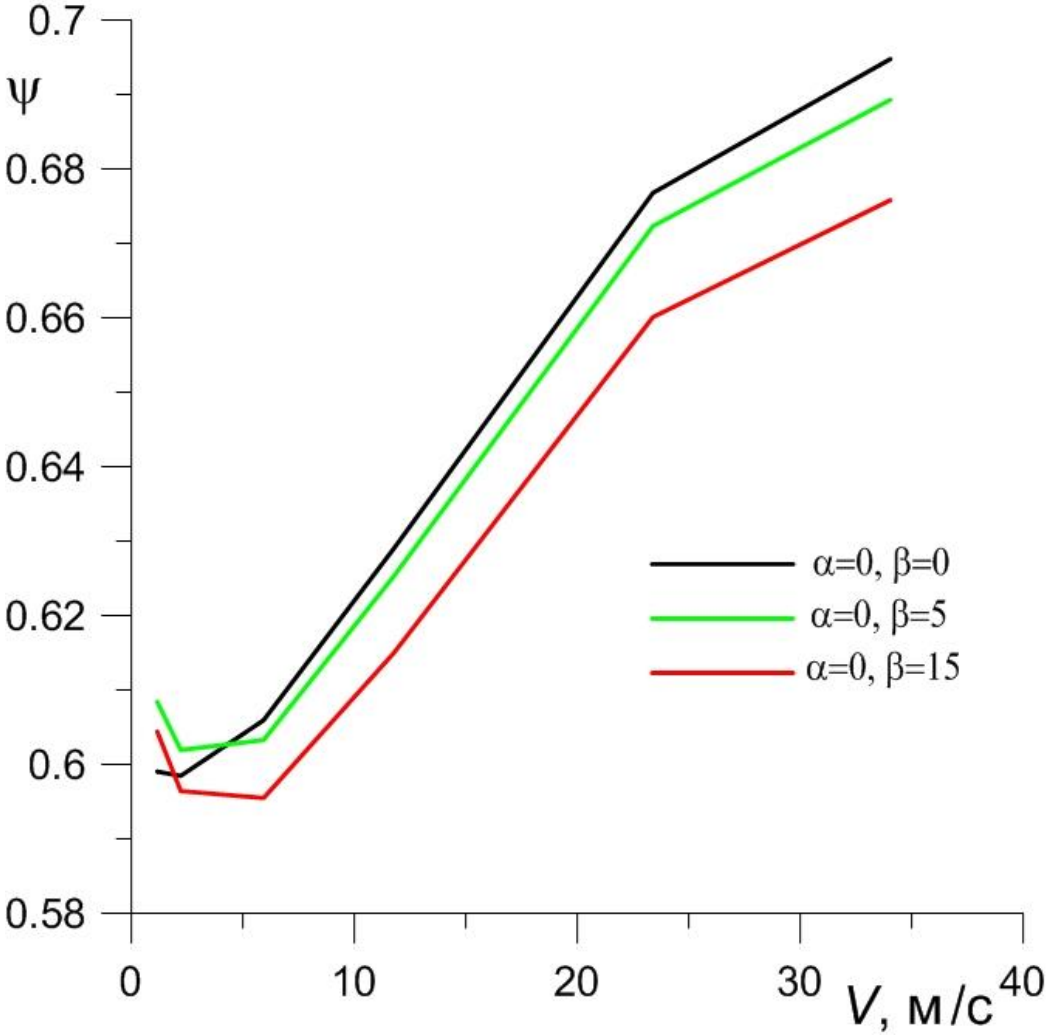


Рисунок 24. График зависимости $\psi_{\alpha\beta}(\mathrm{Re})$, при $\alpha=0$

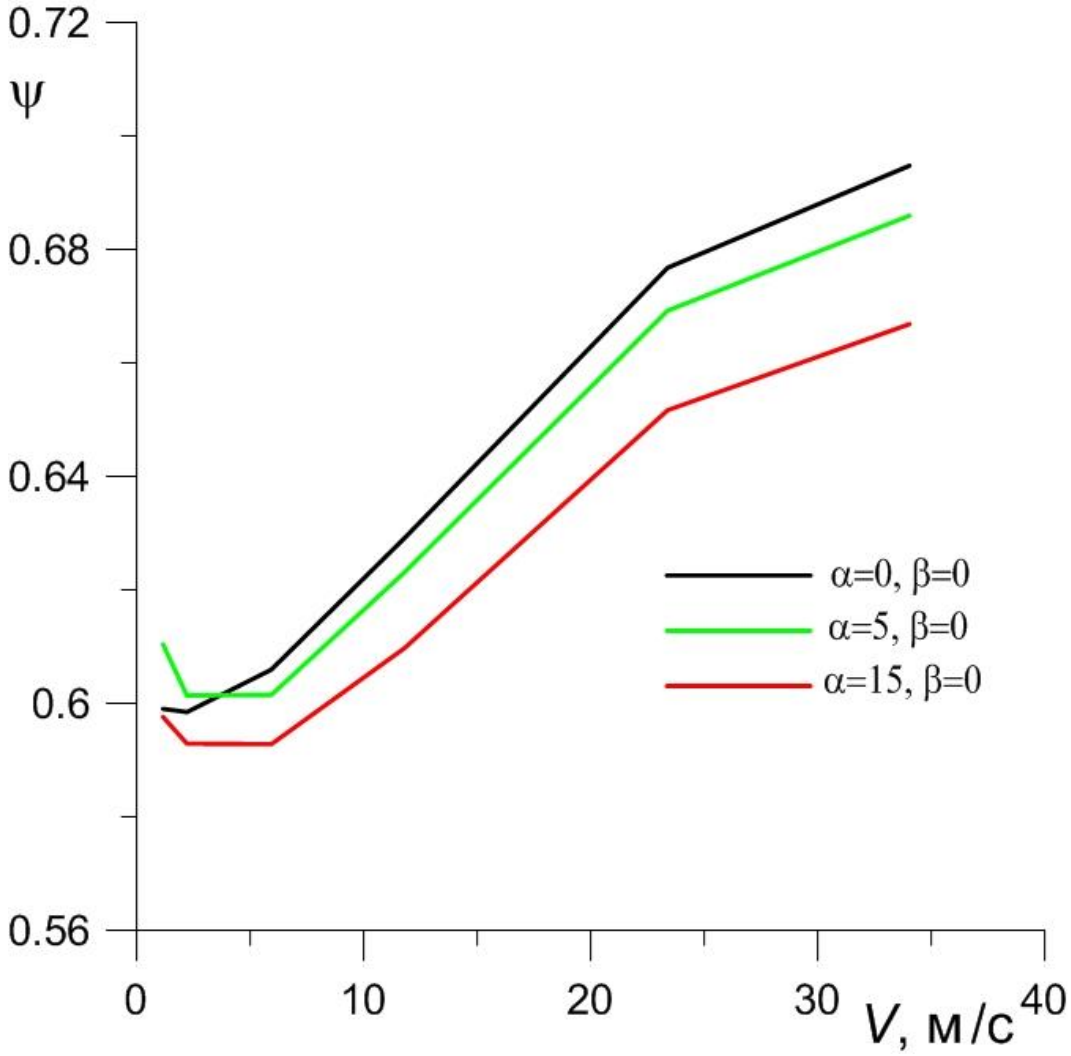
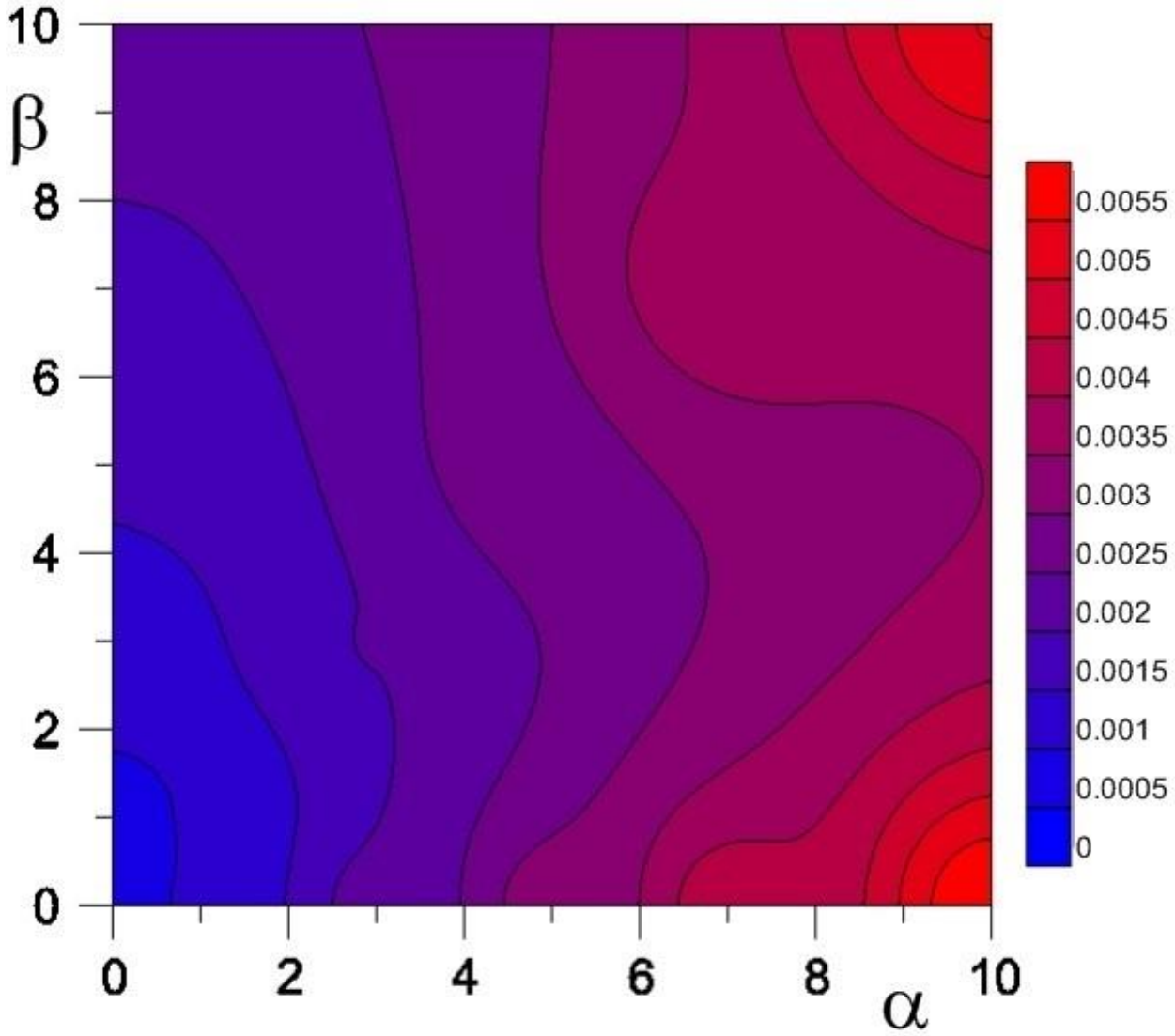


Рисунок 25. График зависимости $\psi_{\alpha\beta}(\mathrm{Re})$, при $\beta = 0$

Карта среднеквадратического отклонения на плоскости углов (α, β) представлена на (рис 26 – 28).



=-

Рисунок 26. Среднеквадратическое отклонение ламинарной модели

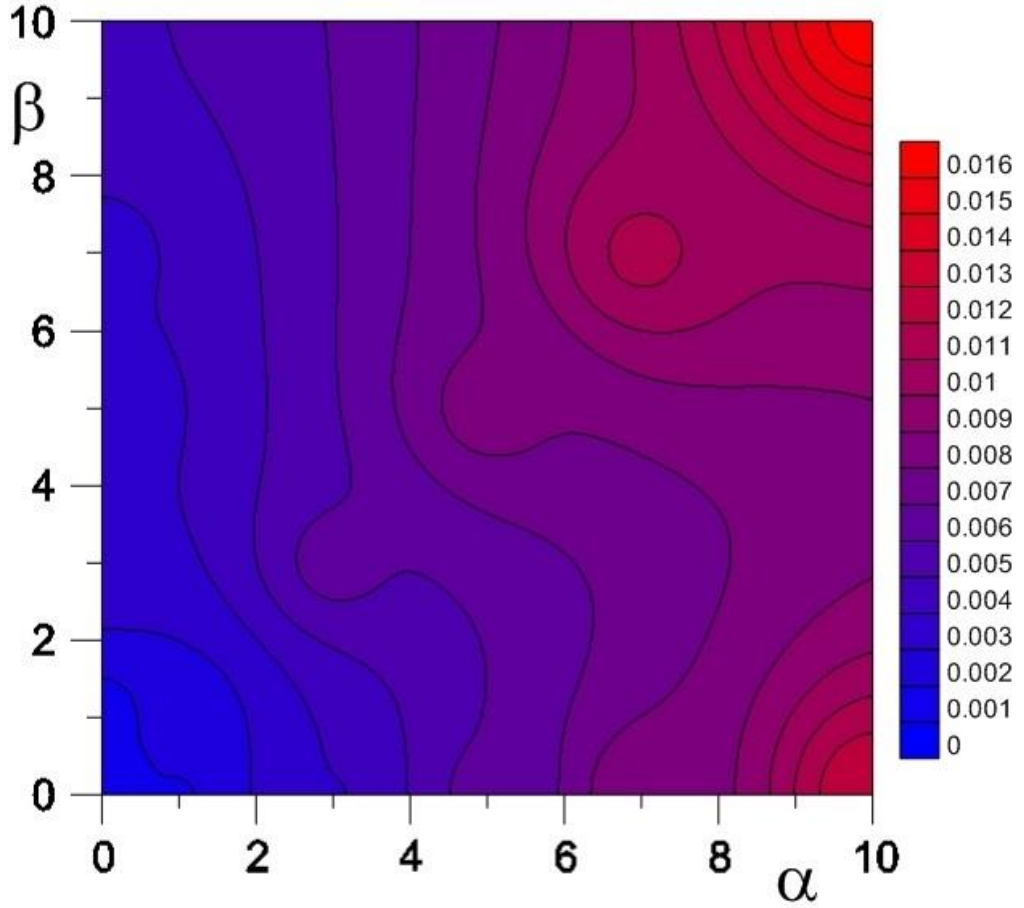
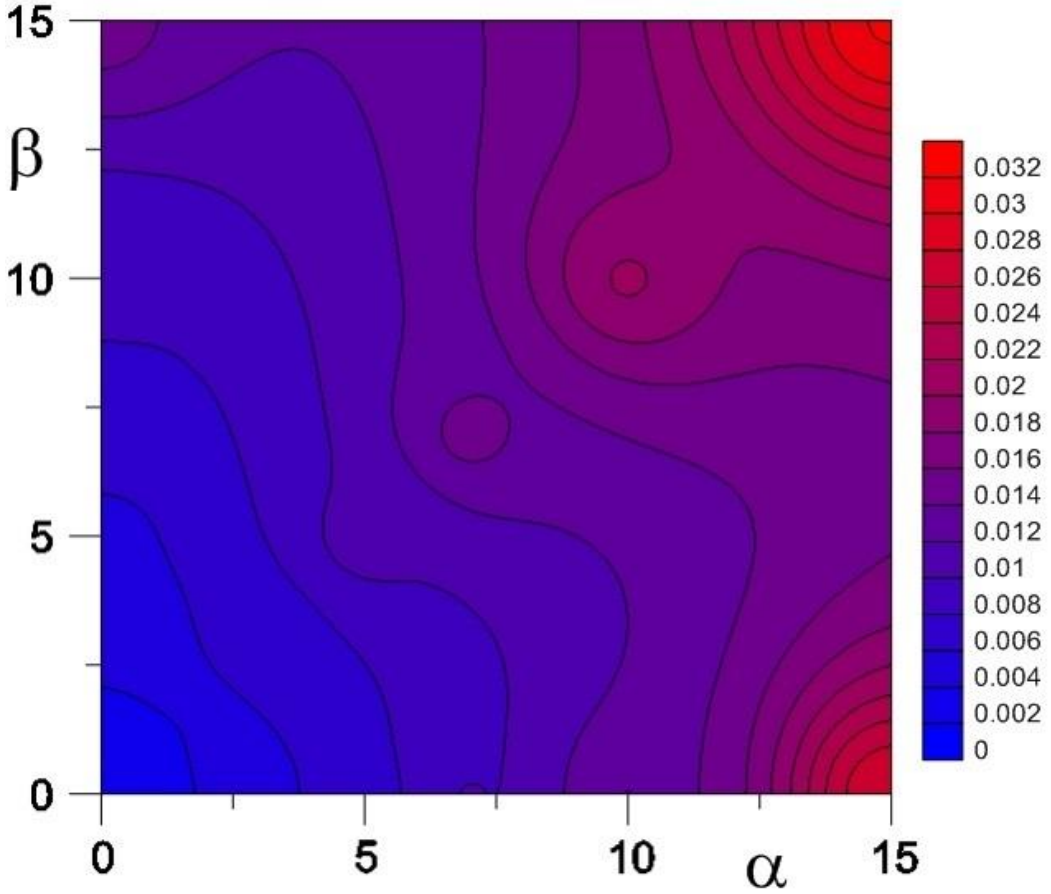


Рисунок 27. Среднеквадратическое отклонение модели K - epsilon



ф

Рисунок 28. Среднеквадратическое отклонение модели Spalart – Allmaras

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как видно, поправочный коэффициент ψ не является постоянной величиной, а зависит от величины измеряемой скорости потока. Попробуем аппроксимировать полученную зависимость степенной функцией. В результате получим зависимость

$$\psi = 0.4612V^{0.1406}$$

дающую погрешность аппроксимации не более 5% (рис. 29), в то время как погрешность постоянного ψ, предложенного ЦАГИ, составляет более 16%.

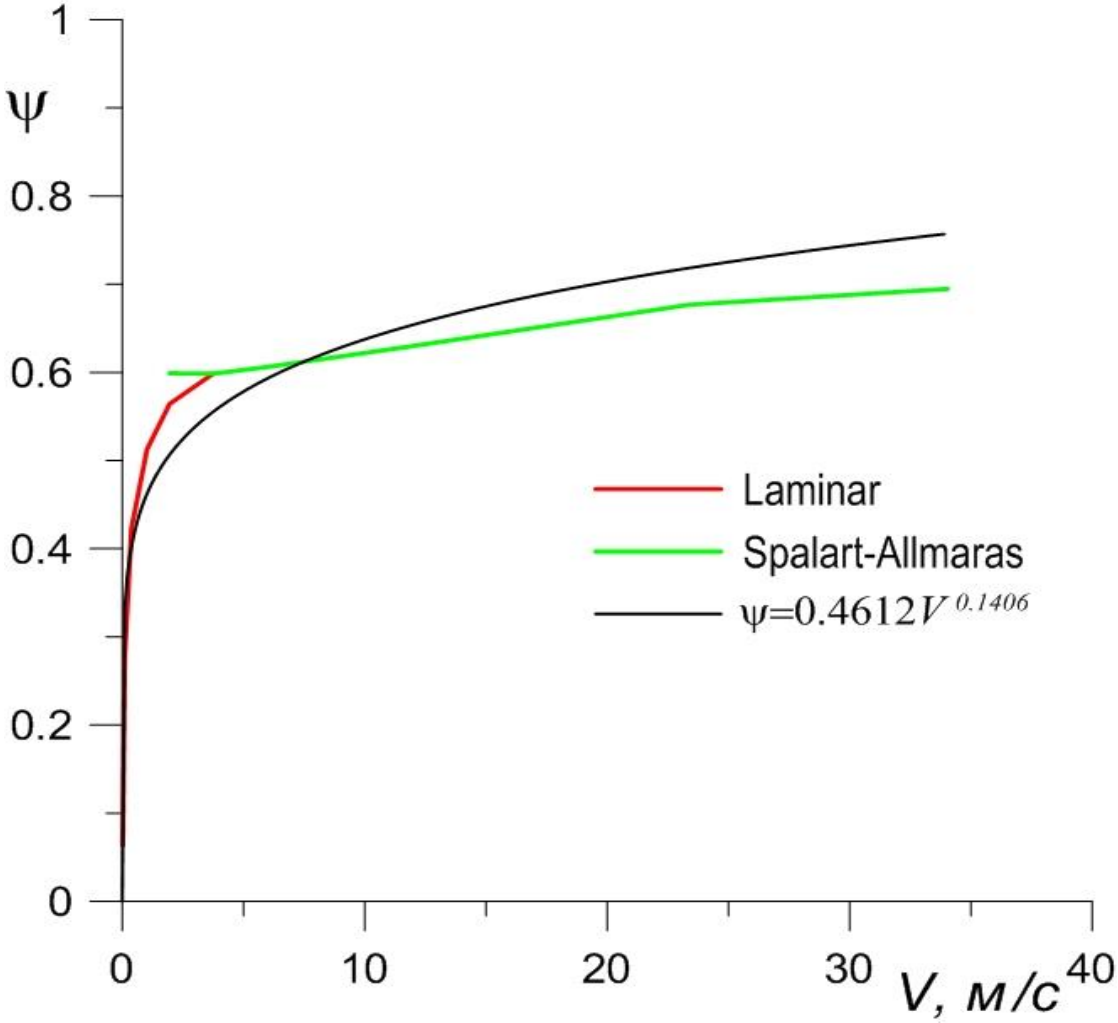


Рисунок 29 Зависимость $\psi = 0.4612V^{0.1406}$

Тогда с использованием введенной зависимости скорость потока можно вычислять по следующей формуле

$$V = \sqrt[1.8594]{\frac{0.9224}{\rho}\Delta p}\,.$$

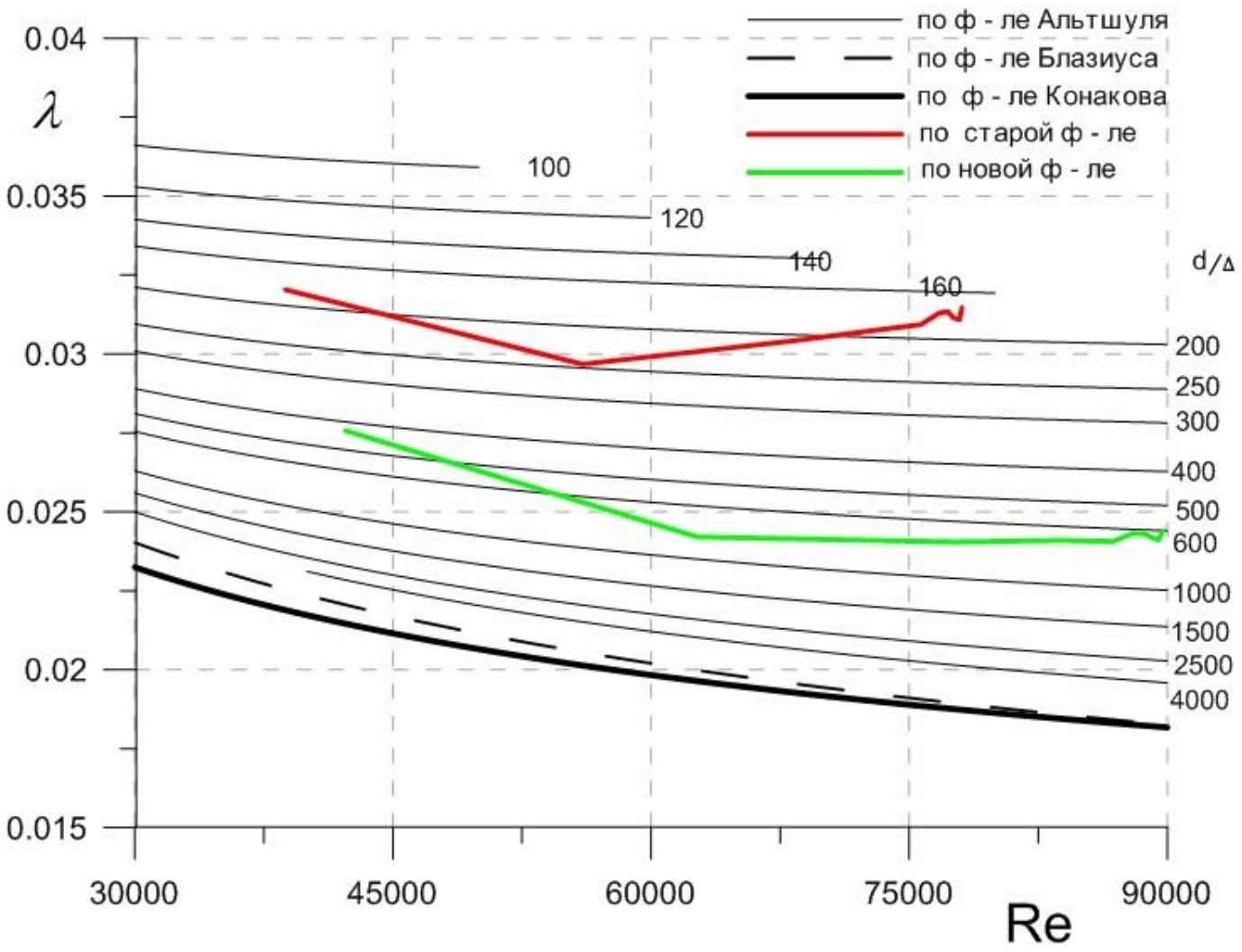


Рисунок 30. Зависимость $\lambda(\mathrm{Re})$ с учетом новой формулы.

На рис. 30 видно, что график, полученный с использованием постоянного ψ не убывает, а график с использованием $\psi = 0.4612V^{0.1406}$ убывает, и заметно отличается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.1.2. М.: Наука. 1978.

2. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред. М.: «Мир». 1974. – 320 с.

3. Кремлевский П.П. Расходометры и счетчики количества: Справочник. Машиностроение. 1989. – 701 с.

4. Монахов В.И. измерение количества жидкости, газа и пара. М. – Л. Госэнергоиздат. 1962. – 128 с.

5. Мазо А.Б. Гидродинамика: учеб. Пособие для студентов нематематических факультетов / А.Б. Мазо, К.А. Поташев. – Казань: Казан. ун-т, 2013. – 2-е изд. – 128 с.

6. А. М. Прохоров. Физический энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия. 1983. – 944 с.

7. Горлин С. М., Слезингер И. И. Физические измерения в газовой динамике и при горении, пер. с англ., ч. 1-2, М., 1957;., Аэромеханические измерения. 1964.

8. С.Г.Нужин; Труды по аэродинамике; Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н.Туполева; Изд-во Казан. техн. ун-та, 2002.—238 с.