

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра теоретической и прикладной механики**

Шевелёв Дмитрий Юрьевич

**ВЛИЯНИЕ ВИХРЕГЕНЕРАТОРОВ В ТУРБУЛЕНТНОМ
ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ЛОКАЛЬНОЕ ТРЕНИЕ И ПЕРЕНОС**

Дипломная работа

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук,
доцент А. Д. Чорный

Допущен к защите

«_____» _____ 2023 г.

Зав. кафедрой теоретической и прикладной механики
доктор физ.-мат. наук, профессор М. А. Журавков

Минск, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 Теория пограничного слоя и его моделирование	7
1.1 Понятие пограничного слоя	7
1.2 Турбулентное состояние пограничного слоя	8
1.3 Структура пограничного слоя	9
1.3.1 Внешняя область	10
1.3.2 Внутренняя область	11
1.3.3 Свойства пограничного слоя	11
1.4 Локальное трение и перенос	12
1.5 Методы моделирования	13
1.5.1 DNS	14
1.5.2 RANS	14
1.5.3 LES	16
1.5.4 DES	17
1.5.5 Оценка производительности	18
ГЛАВА 2 Моделирование с использованием ANSYS FLUENT	19
2.1 Постановка задачи	19
2.2 Визуализация поставленной задачи	19
2.2.1 Геометрия канала	19
2.2.2 Построение сеточной модели	20
2.3 Вычисление в ANSYS Fluent	22
ГЛАВА 3 Анализ полученных данных	24
3.1 Обработка данных	24
3.2 Влияние на локальное трение и перенос	25
3.2.1 Скорость	25
3.2.2 Трение	25
3.2.3 Напряжение	25
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	26
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	27
ПРИЛОЖЕНИЕ А	28
ПРИЛОЖЕНИЕ В	30

РЕФЕРАТ

Отчёт по дипломной работе: 31 с., 7 рис., 5 табл., 4 источников.

Ключевые слова: ВИХРЕГЕНЕРАТОР, ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ, ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ, ЛОКАЛЬНОЕ ТРЕНИЕ И ПЕРЕНОС, СЕТОЧНАЯ МОДЕЛЬ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АНАЛИЗ.

Объект исследования: течение в канале с установленным вихрегенератором.

Цель работы: исследовать влияние вихрегенераторов на локальное трение и перенос.

Методы исследования: численное моделирование методом крупных вихрей.

Результат: оценка влияния вихрегенераторов на локальное трение и перенос.

Область применения: .

РЭФЕРАТ

Справаздача па дыпломнай працы: 31 с., 7 малюнкаў, 5 табліц., 4 крыніц.

Ключавыя словы: ВІХРЭГЕНЕРАТАР, ПАМЕЖНЫ ПЛАСТ, ТУРБУЛЕНТ-НАСЦЬ, МЕТАД МАДЭЛЯВАННЯ БУЙНЫХ ВІХУР, ЛАКАЛЬНАЕ ТРЭННЕ І ПЕРАНОС, СЕТКАВАЯ МАДЭЛЬ, МАДЭЛЯВАННЕ, АНАЛІЗ.

Аб’ект даследавання: плынь у канале з усталяваным віхрэгенератарам.

Мэта працы: даследаваць уплыў віхрэгенератараў на лакальнае трэнне і перанос.

Метады даследавання: лікавае мадэляванне метадам буйных віхур.

Вынік: ацэнка ўплыву віхрэгенератараў на лакальнае трэнне і перанос.

Вобласць прымянення: .

ABSTRACT

Diploma: 31 p., 7 pictures, 5 tables, 4 references.

Keywords: VORTEX GENERATOR, BOUNDARY LAYER, TURBULENCE, LARGE EDDY SIMULATION, LOCAL FRICTION AND TRANSPORT, GRID MODEL, MODELING, ANALYSIS.

Object of research: flow in channel with vortex generator.

Purpose of research: to research influence of vortex generator on local friction and transport.

Research methods: large eddy simulation

Result: assessment of the impact on local friction and transport

Scope: .

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

DNS	Direct Numerical Solution, прямое численное моделирование
RANS	Reynolds-Averaged Navier–Stokes, уравнения Навье-Стокса, осреднённые по Рейнольдсу
LES	Large Eddy Simulation, метод моделирования крупных вихрей
SGS	Sub Grid Scale, модели подсеточного масштаба
DES	Detached Eddy Simulation, метод моделирования отсоединённых вихрей
WALE	Wall-adapting local eddy-viscosity, адаптирующаяся к стене локальная турбулентная вязкость
δ^*	толщина вытеснения
θ	толщина потери импульса
τ_ω	напряжение трения на стенки
C_F	коэффициент трения
u_τ	динамическая скорость
U_0	начальная скорость потока

ВВЕДЕНИЕ

Турбулентные пограничные слои развиваются на поверхностях многих инженерных конструкций: от теплообменных устройств, элементов воздушно-реактивных двигателей до планеров самолетов, корпусов кораблей и крупных строительных сооружений. Они определяют как сопротивление трения, так и перенос тепла. Вихревая структура этих слоев открывает возможность ее изменения путем воздействия на процесс формирования вихрей.

Одним из способов управления и уменьшения потерь энергии в турбулентном пограничном слое является использование методов активного и пассивного контроля турбулентности, например, установка поперечных ребер (вихрегенераторов) на поверхности или введение потока тепла в стенки. Более глубокое понимание особенностей турбулентного пограничного слоя может помочь снизить энергетические затраты и повысить эффективность различных технологий.

Теоретические методы моделирования и исследования явлений переноса в пограничном слое условно можно классифицировать на точные, асимптотические, численные и приближенные. Для математического моделирования явлений переноса и определения эффективности проводимых процессов в промышленных аппаратах чаще используются приближенные и численные методы.

Современное развитие турбулентности как науки не представляется возможным без применения мощных компьютеров, реализующих различные модели и позволяющие выявить их сильные и слабые стороны. Именно вычислительный эксперимент сегодня является источником развития моделей турбулентности, которые, в свою очередь, являются основой для создания новых вычислительных средств.

Целью данной работы является исследования влияния вихрегенератора, установленного на всю длину канала, на локальное трение и перенос. Для проведения вычислений использовался пакет ANSYS Fluent и для постобработки полученных данных CFD Post. В качестве метода использовался метод моделирования крупных вихрей.

ГЛАВА 1

Теория пограничного слоя и его моделирование

1.1 Понятие пограничного слоя

Движение вязких сред практически всегда связано с явлениями переноса в пограничном слое, где локализуются сопротивления трения, тепло- и массоотдачи. Понятие пограничного слоя впервые использовано Людвигом Прандтлем в статье, представленной 12 августа 1904 г., на третьем Международном конгрессе математиков в Гейдельберге, Германия. Классическим примером пограничного слоя является пограничный слой, который образуется на плоской пластине при обтекании ее поверхности жидкостью и пограничный слой в круглых трубах. Более сложным для исследования и математического описания является пограничный слой на поверхностях с различной кривизной (обтекание цилиндра, сферы и др. тел). Такой пограничный слой характеризуется большим градиентом давления и точкой отрыва, за которой производная и скорость потока меняют знаки. Так же значительно сложны и труднодоступны пограничные слои на поверхности раздела двухфазных и многофазных сред.

Пограничный слой – область течения вязкой жидкости с малой по сравнению с продольными размерами поперечной толщиной, образующаяся у поверхности обтекаемого твёрдого тела или на границе раздела двух потоков жидкости с различными скоростями или температурами. Пограничный слой характеризуется резким изменением в поперечном направлении скорости (динамический пограничный слой) или температуры (температурный пограничный слой).

Чем меньше вязкость среды, тем тоньше гидродинамический пограничный слой и большее значение в этом слое имеет градиент скорости. Вне пограничного слоя градиент скорости невелик. Следовательно, силы трения здесь малы, и ими обычно пренебрегают. Между внешним потоком и пограничным слоем резкой границы нет, поскольку средняя скорость жидкости по сечению потока изменяется монотонно, без скачков. Обычно толщину пограничного слоя определяют условно, исходя из того, что на его внешней границе скорость составляет 99 % от скорости внешнего потока.

Значение пограничного слоя очень велико, так как он определяет гидродинамическое сопротивление при движении среды относительно твердого тела, а также сопротивление переносу массы и тепла. Введение этого понятия существенно упростило уравнения моделирования течения жидкости путём разделения потока на две области. Для описания пограничного слоя используются

уравнения Навье-Стокса:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)\end{aligned}\quad (1.1)$$

Существуют три вида течения в пограничном слое:

- ламинарное – движение жидкости упорядочено, слои не смешиваются, частицы вращаются в пределах одного и того же тонкого слоя;
- турбулентное – движение неупорядочено, происходит перемешивание частиц в поперечном направлении и весь пограничный слой беспорядочно завихрен;
- смешанное – переходное состояние от ламинарного к турбулентному режиму движения.

1.2 Турбулентное состояние пограничного слоя

Ламинарное течение устойчиво только при некоторых условиях, определяемых значением критического числа Рейнольдса Re_{cr} . Обычно переход от ламинарного к турбулентному режиму течения жидкости в трубах наблюдается при $Re_{cr} \approx 2300$. Однако этот переход зависит от устойчивости исходного ламинарного течения по отношению к внешним возмущениям. Если вход в трубу сделать плавным, то ламинарное движение в трубе может поддерживаться при больших числах Рейнольдса, например до 24 000. Существенно влияют на Re_{cr} и такие факторы, как градиент давления, форма канала, шероховатость его стенок, вдув и отсос пограничного слоя.

Турбулентное движение в пограничном слое возникает из-за неустойчивости потока, которая проявляется в виде вихрей различных размеров и интенсивности. Эти вихри перемешивают слои жидкости, что приводит к увеличению переноса массы и энергии вдоль поверхности твердого тела. Параметры турбулентного потока в пограничном слое характеризуются такими величинами, как скорость, давление, плотность и температура. Важными параметрами являются также коэффициент трения, переноса тепла и массы. Турбулентное течение с большим числом Рейнольдса называют развитой турбулентностью.

Для описания турбулентности используются уравнения Навье-Стокса, которые описывают законы сохранения массы, импульса и энергии для жидкости. Однако аналитическое решение этих уравнений возможно только для очень простых течений. В общем случае для описания турбулентных потоков применяются численные методы, такие как метод прямого численного моделирования или моделирование крупных вихрей. Одной из фундаментальных проблем гидродинамики турбулентных течений является проблема турбулентного переноса. Она связана с необходимостью описать перемещение частиц жидкости и массы, энергии и импульса в условиях сложных турбулентных потоков

Существует каскадный перенос энергии, т.е. её передача от более крупных вихрей к более мелким. Наиболее крупные вихри получают энергию от осредненного течения, передают её всё более мелким, а наиболее мелкие диссипируют в тепло. Скорость этого процесса в силу хаотичности природы турбулентности также колеблется вокруг некой величины, при этом ее мгновенное значение может становиться отрицательным. Иными словами, в некоторые моменты времени энергия может передаваться от более мелких вихрей к более крупным, но эта флуктуация компенсируется более интенсивной передачей энергии по каскаду в другие моменты времени.

1.3 Структура пограничного слоя

В турбулентном пограничном слое обычно выделяется несколько областей: внешняя и внутренняя. Они отличаются друг от друга разными масштабами вихревых структур[4].

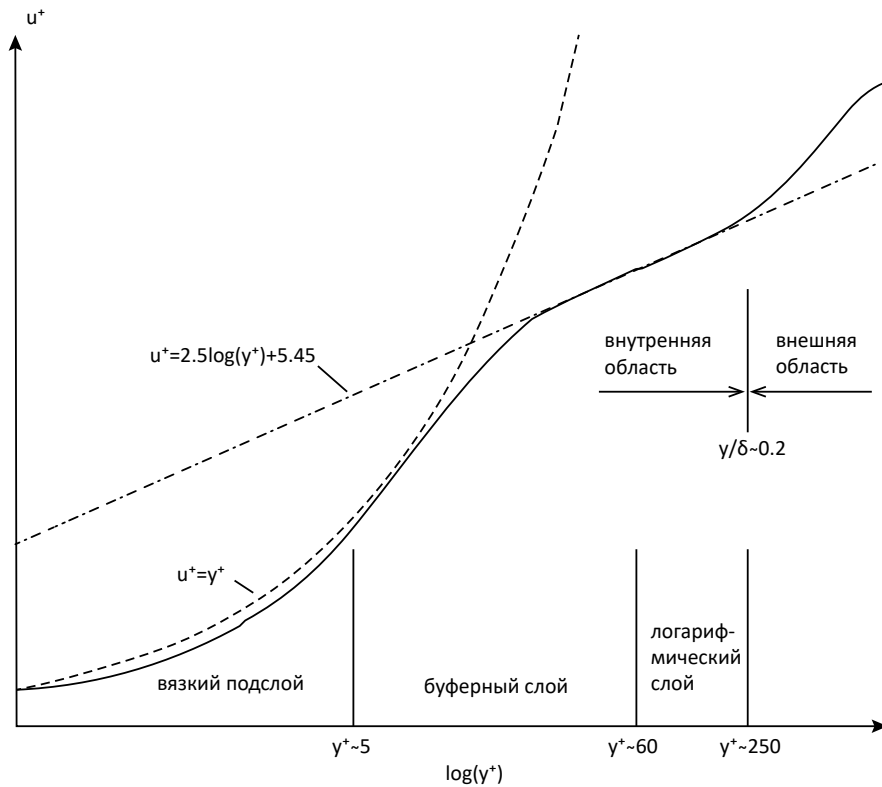


Рисунок 1.1: Схема слоя

Внутренняя область пограничного слоя занимает примерно 20% от толщины всего слоя и в ней генерируется до 80% энергии турбулентности. На формирование течения в пограничном слое основное влияние оказывают вязкость, теплопроводность и диффузионная способность жидкости. Внутри динамического пограничного слоя происходит плавное изменение скорости от её значения во внешнем потоке до нуля на стенке вследствие прилипания вязкой жидкости к твёрдой поверхности. Аналогично внутри пограничного слоя плавно изменяется температура.

1.3.1 Внешняя область

Внешний слой является областью полностью развитого турбулентного течения, в котором распределение скорости описывается логарифмическим законом. Полное затухание возмущений во внешней области происходит на расстоянии, во много раз превышающем линейный масштаб турбулентности.

Чтобы определить поток во внешней зоне, применяют фильтрованные или усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса. В то же время, профиль скорости во внутренней зоне сравнительно мало зависит от различных внешних условий, таких как числа Рейнольдса и градиент давления, что позволяет использовать универсальные соотношения (пристеночные функции) для

связи параметров потока с расстоянием от стенки. Этот метод также базируется на гипотезе о локальном равновесии энергии турбулентных пульсаций и свойствах локальной изотропности диссипирующих вихрей.

1.3.2 Внутренняя область

Вязкий подслой, буферный и логарифмический слои составляют внутреннюю область пограничного слоя. Она характеризуется высокой скоростью переноса массы, импульса и тепла, что приводит к повышенной трению и потере энергии.

$$\begin{aligned} v \frac{\partial u}{\partial y} &\gg -\overline{u'v'} && \text{вязкий} \\ v \frac{\partial u}{\partial y} &\approx -\overline{u'v'} && \text{буферный} \\ v \frac{\partial u}{\partial y} &\ll -\overline{u'v'} && \text{логарифмический} \end{aligned} \quad (1.2)$$

Существует два подхода к моделированию течения в пристеночной области. В первом подходе используются полуэмпирические формулы (пристеночные функции) для описания внутреннего слоя потока, в то время как во втором подходе модели турбулентности модифицируются таким образом, чтобы разрешать всю пристеночную область потока, включая вязкий подслой, при условии обеспечения необходимого разрешения сетки в пограничном слое. Такие модели турбулентности могут быть использованы для расчета турбулентных течений во всей расчетной области (включая пристеночную область течения).

1.3.3 Свойства пограничного слоя

Толщина пограничного слоя трудно определима как в расчёте, так и в эксперименте. Для определения используются понятия: толщина вытеснения δ^* и толщина потери импульса θ .

$$\delta^* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U_0}\right) dy \quad \theta = \delta^{**} = \int_0^\infty \frac{u}{U_0} \left(1 - \frac{u}{U_0}\right) dy \quad (1.3)$$

Кроме того используется безразмерный параметр H :

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} \quad (1.4)$$

Число Рейнольдса характеризуется двумя величинами (Re_x и Re_θ): рас-

стоянием от начала x и толщиной θ .

$$Re_x = \frac{xU_0}{\nu} \quad Re_\theta = \frac{\theta U_0}{\nu} \quad (1.5)$$

Используя напряжение трения на стенке τ_w можем вычислить коэффициент трения C_F и динамическую скорость u_τ :

$$\tau_w = \nu \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_W \quad C_F = \frac{\tau_w}{0.5\rho U_0^2} \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (1.6)$$

Не менее важной характеристикой пограничных слоев является продольный градиент давления:

$$\frac{dp}{dx} = -\rho U_0 \frac{dU_0}{dx} \quad (1.7)$$

Часто на пограничные слои влияют такие факторы: кривизна поверхности κ , скорость закачки и откачки жидкости, шероховатость поверхности k_s^+ (высота бугорков).

$$\kappa = \frac{\delta^*}{R} \quad \frac{V_W}{u_\tau}, \frac{V_W}{U_0} \quad k_s^+ = \frac{k_s u_\tau}{\nu} \quad (1.8)$$

Важным свойством пограничного слоя является выполнение интегрального уравнения импульсов. Верно и обратное: если уравнение импульсов не выполняется, то уравнения плоского пограничного слоя также не верны для этого течения. Это может быть обусловлено разными причинами: трехмерность течения, его нестационарность, влияние вверх по потоку, изменение давления поперек пограничного слоя, влияние нормальных Рейнольдсовых напряжений и т.д.

$$\frac{d\theta}{dx} + \frac{dU_0}{dx} \cdot \frac{2+H}{U_0} \theta - \frac{C_f}{2} = 0 \quad (1.9)$$

1.4 Локальное трение и перенос

Теоретическую основу описания процессов переноса в пограничном слое составляют фундаментальные законы сохранения и равновесия, одним из свойств которых является их инвариантность к масштабу и к взаимодействию с другими явлениями, т.е. структура математического описания пограничного слоя слабо зависит от контактного устройства.

Для изучения влияния вихрегенераторов в турбулентном пограничном слое на локальное трение и перенос изучались следующие параметры: средняя скорость и её пульсация, напряжение трения на стенке τ_w , коэффициент трения C_F и динамическая скорость u_τ . Для представления профилей компонент средней

скорости и их пульсаций использовались безразмерные координаты u^+ и y^+ :

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} \quad y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (1.10)$$

1.5 Методы моделирования

Несмотря на интенсивное развитие вычислительной техники и впечатляющие успехи, достигнутые в последние годы как в области построения эффективных численных алгоритмов, предназначенных для решения задач гидромеханики и тепломассопереноса, так и в разработке сопутствующего математического обеспечения (генераторы сеток, интерактивные системы ввода данных и систем визуализации результатов расчетов), проблема численного моделирования турбулентности, как и на протяжении многих предшествующих десятилетий, по-прежнему остается одной из наиболее сложных и актуальных проблем механики жидкостей. В отличие от ламинарных течений однофазной среды (жидкости), расчет которых, благодаря отмеченным выше достижениям, стал во многом рутинной процедурой, надежное предсказание характеристик сложных турбулентных течений, представляющих наибольший практический интерес все еще остается сложным.

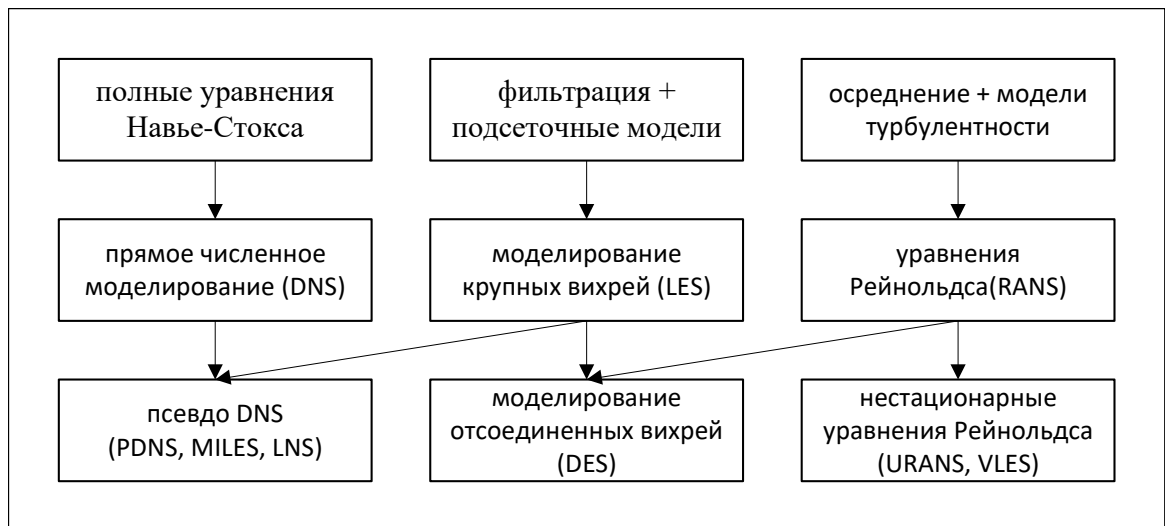


Рисунок 1.2: Виды методов по уравнениям

Среди основных методов численного моделирования трехмерных турбулентных течений можно выделить: прямое численное моделирование (DNS), моделирование крупных вихрей (LES) и решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Имеются также различные промежуточные подходы, сочетающие в себе те или иные черты RANS, LES и DNS, например, метод моделирования отсоединенных вихрей (DES), и ряд других, не имеющих

должного физического обоснования и потому не получивших широкого распространения.

1.5.1 DNS

Прямое численное моделирование(DNS) предполагает решение полных нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса, позволяющее получить мгновенные характеристики турбулентного потока. Проблемы с широким использованием DNS связаны с высокими требованиями к используемой разностной схеме, удовлетворением начальных и граничных условий, а также ограниченными ресурсами вычислительной техники. Расчетная область при этом должна быть достаточно протяженной, чтобы вместить наибольшие масштабы турбулентности, а шаг интегрирования по времени должен иметь порядок колмогоровского масштаба.

Re	6.6×10^3	2.0×10^4	1.0×10^5	1.0×10^6
Кол-во узлов сетки	2×10^6	4×10^7	3×10^8	1.5×10^9
150 MFlops	37 ч	740 ч	6.5 лет	3000 лет
1 TFlops	20 с	400 с	8.3 ч	4000 ч

Таблица 1.1: Затраты времени при различных параметрах

1.5.2 RANS

В инженерных приложениях широко используются математические модели, основанные на численном решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса(RANS). При использовании уравнений Рейнольдса основной интерес проявляется к динамике крупномасштабных вихрей, ответственных за переносные свойства турбулентных течений. При замыкании уравнений Рейнольдса рассматриваются масштабы длины, типичные для энергосодержащих вихрей, в которых $Re \gg 1$ (за исключением пристеночных областей). Для учета пристеночного влияния диссипирующих вихрей и энергосодержащих вихрей при $Re \sim 1$ используются демпфирующие функции. Уравнения Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (1.11)$$

Для выполнения уравнений Навье-Стокса необходимо соблюдение двух условий:

1. Среда должна быть сплошной.
2. Выполнение обобщённого реологического закона Ньютона.

Применив к уравнениям осреднение Рейнольдса получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} &= 0 \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \end{aligned} \quad (1.12)$$

Для замыкания этой системы уравнений необходимо определить шесть различных компонент симметричного тензора турбулентных напряжений. Именно выражение этих компонент через параметры осредненного потока и называется моделью турбулентности. Ниже представлена таблица с основными этапами развития теории.

Год	Ученые	Что изучено
1877	Буссинеск Ж. В.	гипотеза Буссинеска
1895	Рейнольдс О.	осреднение по Рейнольдсу
1925	Прандтль Л.	теория пути смешивания Прандтля
1930	Карман Т.	формула Кармана
1942	Колмогоров А. Н.	формула Колмогорова, модель $k-\omega$
1951	Ротта	первая модель Рейнольдсовых напряжений
1956	Клаузер	формула Клаузера
1956	Ван-Дрист	демпфирующий множитель
1974	Лондер Б. и Сполдинг Д.	модель $k-\epsilon$

Таблица 1.2: Этапы развития теории

Появление огромного количества моделей привело к необходимости выбора. Для этого необходимо провести сравнительный анализ моделей. Однако при попытке тестирования естественным образом возникают определенные трудности. Во-первых, необходимо выбрать течения, для которых известен набор достоверных экспериментальных данных, свободных от погрешностей, а также выбрать критерии для сравнения моделей. Во-вторых, необходимо провести серийные расчеты этих течений с использованием разных моделей турбулентности и при этом быть уверенными в независимости результата от про-

граммной реализации задачи. Результатом такой работы должны явиться рекомендации по области применимости тех или иных моделей турбулентности.

1.5.3 LES

Метод моделирования крупных вихрей(LES) был предложен Иосифом Смагоринским в 1963 году. Он основан на двух предположениях. Первый предполагает, что течение можно разделить на движение крупных и мелких вихрей. Крупные вихри, находящиеся под прямым воздействием граничных условий и несущие в себе максимум рейнольдсовых напряжений, рассчитываются. Мелкомасштабная турбулентность считается изотропной и имеющей универсальные характеристики, а потому менее критичной и более поддающейся моделированию. Другой заключается в возможности аппроксимации нелинейных взаимодействий между крупными и мелкими вихрями только по крупным вихрям с использованием подсеточных моделей(SGS). Иначе говоря, принимается гипотеза о статистической независимости крупных и мелких вихрей.

Статистика крупных вихрей обычно не чувствительна к подсеточному моделированию за исключением пристеночной области. Имеющиеся подсеточные модели корректно предсказывают не только осредненные характеристики потока (первые и вторые моменты), но также и флуктуации интегральных характеристик, например, коэффициентов сопротивления и подъемной силы[1].

Мелкомасштабное движение исключается из уравнений Навье-Стокса при помощи применения операции фильтрации и моделируются с помощью подсеточных моделей. На рисунке 1.3 показан принцип работы фильтров, где $g(x)$ - исходный вариант, $f(x)$ - после фильтрации.

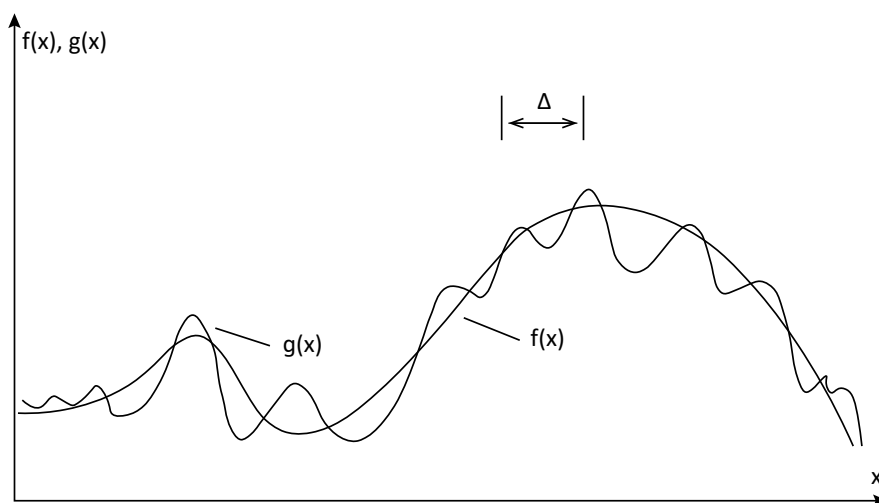


Рисунок 1.3: Исключение мелкомасштабных движений фильтрацией

Уравнение фильтра, применимое к пространственно временному полю $\phi(x, t)$ представлено ниже:

$$\overline{\phi(x, t)} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(r, t') G(x - r, t - t') dt' dr \quad (1.13)$$

В данном случае G - ядро, характерное для каждого типа фильтра.

Решение, полученное с помощью LES, содержит более богатую информацию по сравнению с решением на основе уравнений Рейнольдса, например, не только характеристики среднего течения (поля скорости, концентрации, температуры, давления) и распределения рейнольдсовых напряжений, но также и спектральные характеристики (спектры пульсаций скорости и давления), двухточечные моменты, временные и пространственные масштабы турбулентности.

1.5.4 DES

Характерные для отрывных течений крупномасштабные нестационарные трехмерные вихревые структуры определяются конкретными граничными условиями и геометрическими характеристиками рассматриваемых течений и не могут быть описаны в рамках таких моделей. Это стимулируют поиск и разработку гибридных подходов, сочетающих в себе экономичность RANS и универсальность LES.

В методе моделирования отсоединенных вихрей (DES) в области присоединенного пограничного слоя метод функционирует в режиме уравнений Рейнольдса, а в области отрыва потока переходит в LES. При этом достигается сочетание лучших качеств обоих подходов – высокая точность и экономичность уравнений Рейнольдса в области присоединенного пограничного слоя и универсальность LES в отрывной области. Хотя DES, в отличие от RANS, является принципиально нестационарным трехмерным подходом, необходимые для его реализации сетки в пристеночной области совпадают с сетками, необходимыми для решения уравнений Рейнольдса, и являются на много порядков меньшими, чем сетки, требуемые для разрешения мелких пристенных вихрей в рамках LES. По мере измельчения сетки DES асимптотически приближается к LES и далее к DNS. Конкретные реализации DES основаны на использовании модели турбулентной вязкости Спаларта-Аллмараса и модели Ментера[3].

Как следует из названия метода DES, он создавался для расчета отрывных течений. Именно такие течения лучше других подходят для этого метода. Во-первых, наличие массивов отрыва в большинстве случаев приводит к его пульсациям, как следствие этого, к возникновению автоколебательного течения с крупными когерентными структурами. Во-вторых, наличие отрывной зоны

позволяет обойти проблему создания турбулентных пульсаций на входе в LES области.

1.5.5 Оценка производительности

Оценка количества узлов сетки и временных шагов, необходимых для реализации DNS и LES, показывает сложность проблемы с вычислительной точки зрения.

Метод	Число узлов сетки	Число шагов по времени	Готовность
RANS	10^7	10^3	1985
DES	10^8	10^4	2000
LES	$10^{11.5}$	$10^{6.7}$	2045
DNS	10^{16}	$10^{7.7}$	2080

Таблица 1.3: Перспектива применения методов

Готовность означает практическое применение метода с затратой времени не более суток. Для оценки необходимых вычислительных ресурсов (например, быстродействия и объема оперативной памяти) возьмем расчетную сетку $100 \times 100 \times 100$ узлов (10^6 точек). В каждом узле необходимо вычислить около 10 функций (составляющие скорости, плотность, давление, температуру, характеристики турбулентности, концентрации компонентов смеси). Значения неизвестных функций находятся в результате решения системы нелинейных уравнений, что требует от 200 до 1000 арифметических операций. За один шаг по времени необходимо выполнить 10^{10} операций с плавающей точкой. Для исследования развития процесса во времени требуется до 1000 временных шагов. В результате, выполнение одного расчета требует 10^{13} операций с плавающей точкой. Для проведения одного расчетного варианта компьютер с производительностью 100 МФлопс (10^8 операций с плавающей точкой в секунду) затратит 10^7 секунд. Для проведения расчета за 100 минут потребуется компьютер с производительностью 0.1 ТФлопс.

ГЛАВА 2

Моделирование с использованием ANSYS FLUENT

2.1 Постановка задачи

Начальная скорость на входе в канал $U_0 = 0.29$ м/с. На выходе из канала выставлено условие равенства нулю производной по нормали к границе.

$$\frac{\partial}{\partial n} = 0 \quad (2.1)$$

Граничные условия непротекания и прилипания устанавливаются для стенки. Это выражено равенством нулю нормальной и тангенциальной составляющих скорости.

$$v \cdot n = 0 \quad v \cdot \tau = 0 \quad (2.2)$$

Здесь n и τ представляют собой единичные векторы нормали и касательной к поверхности канала. Граничные условия для давления выставляются при помощи дискретизации уравнения изменения количества движения в проекции на нормаль к стенке.

2.2 Визуализация поставленной задачи

Для построения геометрии канала и создания сеточной модели использовались встроенные средства по ANSYS.

2.2.1 Геометрия канала

Объектом исследования является турбулентный пограничный слой в канале. Канал разбит на две части. Первая часть представляет собой сужение от 369.5×149.8 мм в начале до размеров 124×50 мм. Длина этого участка 396 мм. Он позволяет значительно увеличить скорость потока жидкости. Вторая часть – прямолинейная, длиной в 1100 мм.

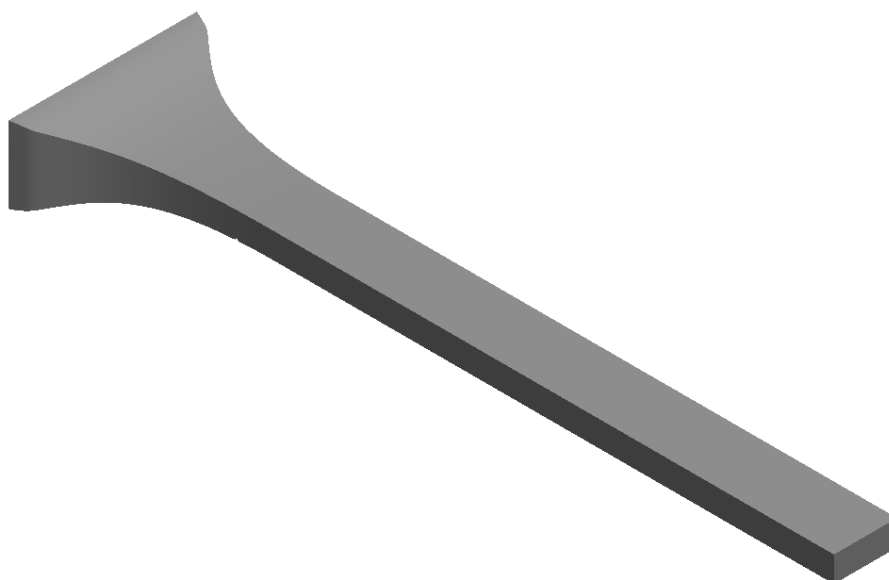


Рисунок 2.1: Общий вид канала

На расстоянии 323.9 мм от входа в канал, у основания расположен вырез представляющий проволоку радиусом 2.1 мм и высотой 1.98 мм. Это препятствие и создаёт турбулентное состояние.



Рисунок 2.2: Вид препятствия в канале

2.2.2 Построение сеточной модели

Существует несколько методов моделирования сеточных моделей в Ansys, которые можно использовать в зависимости от типа и размера модели.

Первый – это метод пространственного разбиения, который часто используется для моделирования твердых тел. Этот метод заключается в разбиении

объекта на более мелкие элементы, называемые конечными элементами. Затем каждый конечный элемент аппроксимируется более простыми формами, такими как треугольники или прямоугольники, чтобы создать сетку.

Второй – это метод генерации сетки на основе узлов. В этом методе модель представляется в виде набора узлов, соединенных линиями или поверхностями. Затем сетка строится на основе этой структуры.

Третий – это метод многократного разделения. Этот метод часто используется для моделирования пространственных объектов, таких как воздушные суда или автомобили. Он заключается в разбиении объекта на более мелкие блоки и последующем разделении каждого блока на еще более мелкие блоки. Затем каждый блок аппроксимируется более простыми формами для создания сетки.

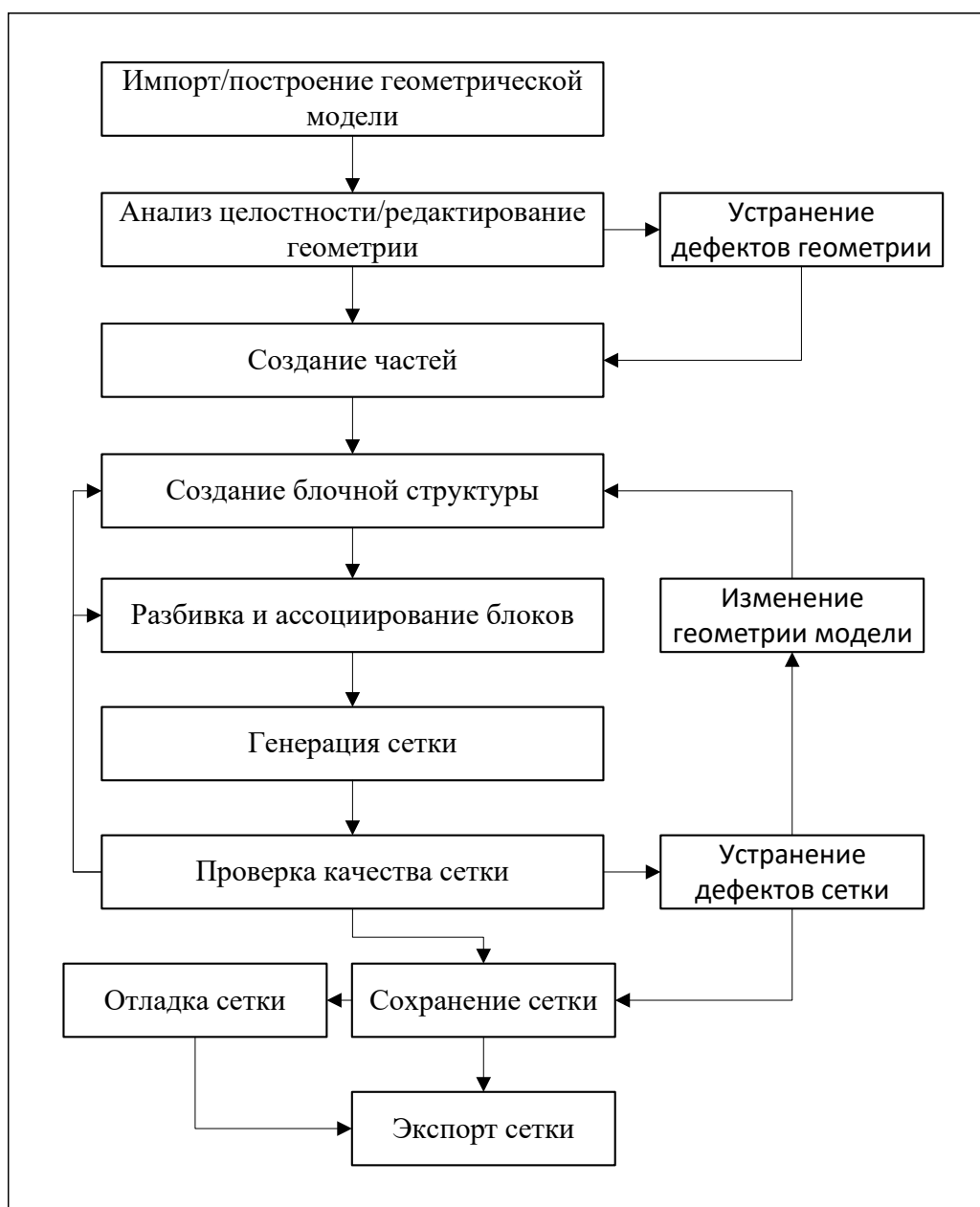


Рисунок 2.3: Схема работы над сеточной моделью

На рисунке 2.3 представлена схематический план генерации сетки. Этот способ наиболее оптимальный для построения достаточно качественной сеточной модели. Разбиение геометрии на части позволяет ускорить построение, путём параллельного распределения вычислений (на каждую часть выделяется одно ядро). Кроме того, выключения режима многопоточности (одно физическое ядро делится на два виртуальных) для процессора увеличивает производительность, т. к. используется вся мощность ядра, а не его половина.

В результате работы над сеточной моделью удалось добиться оптимального результата для вычислений. Модель канала была разбита на 4 блока. Первый блок – вход в канал, второй – участок с препятствием, третий – до конца сужения, четвёртый – прямой участок канала. Статистика сетки: 51397337 узлов и 12665608 элементов. Полученная модель имеет уплотнение к низу канала, т. к. особую важность для изучения в данной работе составляет пограничный слой.

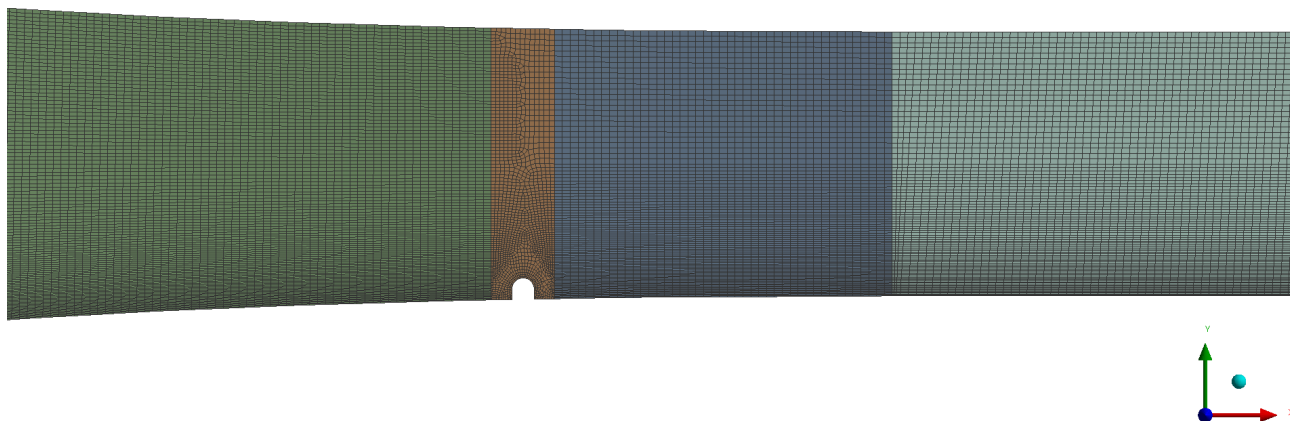


Рисунок 2.4: Сеточная модель

2.3 Вычисление в ANSYS Fluent

ANSYS Fluent – это программное обеспечение для численного моделирования физических процессов в жидкостях, газах и теплообменных устройствах. С помощью ANSYS Fluent можно проводить расчеты течения жидкости или газа, теплопередачи, химических реакций и других важных явлений. Программа поддерживает широкий спектр физических моделей и методов решения, что позволяет ее применять для самых разнообразных задач. ANSYS Fluent имеет удобный пользовательский интерфейс, который позволяет легко создавать, настраивать и запускать вычислительные модели. Также программа предоставляет мощные инструменты для анализа результатов и визуализации данных. В це-

лом, ANSYS Fluent является одной из самых популярных и мощных программ для численного моделирования в области тепло- и массопереноса, гидродинамики и других областей физики.

В качестве жидкости использовалась вода с характеристиками: $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ и $\nu = 0.001003 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$. Для подсеточной модели метода LES использовалась модель WALE с коэффициентом $C_w = 0.325$. Основные преимущества данной модели:

- пространственный оператор содержит как локальные деформации, так и скорости вращения. Таким образом, все структуры турбулентности, имеющие отношение к диссипации кинетической энергии, вычисляются этой моделью;
- турбулентная вязкость естественным образом стремится к нулю вблизи стенки, так что ни постоянная(динамическая) регулировка, ни функция демпфирования не требуются для расчета течений, ограниченных стенкой;
- модель дает нулевую турбулентную вязкость при чистом сдвиге. Таким образом, он может воспроизвести процесс перехода от ламинарного к турбулентному потоку за счет роста линейных неустойчивых режимов.

Кроме того, модель WALE инвариантна к любому перемещению или вращению координат, и требуется только локальная информация (отсутствие операции проверки-фильтрации и сведений о ближайших точках в сетке), так что она хорошо подходит для LES в сложных геометриях[2].

Параметры, связанные с расчётом уравнений:

Параметр	Метод
Схема	SIMPLEC
Градиент	Least squares cell based
Давление	Second order
Импульс	Bounded central differencing
Время	Bounded second order implicit

Таблица 2.1: Перечень параметров решателя

С описанными настройками и параметрами выше, был запущен расчёт в ANSYS FLUENT. Размер временного шага $\Delta t = 0.001 \text{ s}$, их количество $s_t = 10000$. На каждый шаг рассчитывалось $s_i = 50$ итераций. Это составляет 10 с реального времени.

ГЛАВА 3

Анализ полученных данных

3.1 Обработка данных

В результате вычислений, которые заняли примерно месяц, были полученные *.dat* файлы. Каждый из этих массивов данных соответствует определённому временному шагу. Для последующей обработки и на их основе построение графиков использовалось встроенное средство ANSYS CFD-Post. Для анализа влияния вихрегенераторов на локальное трение и перенос использовались различные сечения в разных частях канала. Некоторые из них представлены на рисунке 3.1.

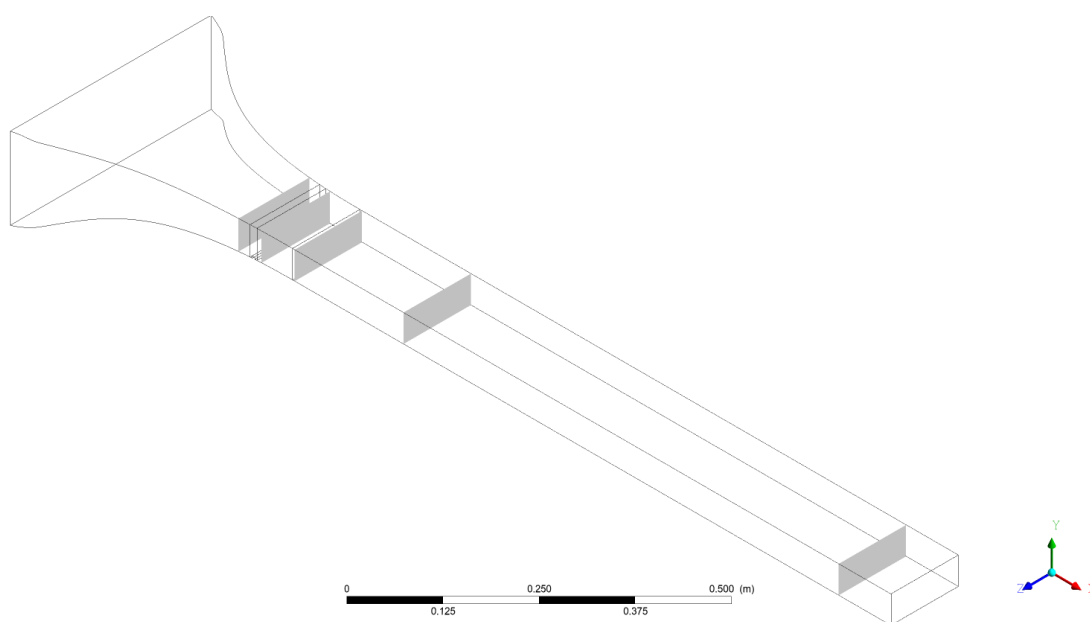


Рисунок 3.1: Сечения для анализа

Начало координатный осей модели расположено в центре входа канала. Рассматривались сечения на разных высотах вдоль и различных расстояниях от входа в канал. На таблице ниже представлен перечень сечений, расположение и их описание. Изображения в приложениях имеют названия исходя из таблицы.

Подпись	Плоскость	Расположение	Описание
PlaneXY	XY	$Z = 0$	вдоль всего канала
PlaneYZ300	YZ	$X = 300$	перед препятствием
PlaneYZ340	YZ	$X = 340$	за проволокой
PlaneYZ400	YZ	$X = 400$	на входе в прямой участок
PlaneYZ600	YZ	$X = 600$	далее по каналу
PlaneYZ1400	YZ	$X = 1400$	на выходе из канала
PlaneXZ0	XZ	$Y = 0$	над пограничным слоем
PlaneXZ20M	XZ	$Y = -20$	над препятствием
PlaneXZ23M	XZ	$Y = -23$	на уровне проволоки

Таблица 3.1: Перечень сечений

3.2 Влияние на локальное трение и перенос

3.2.1 Скорость

3.2.2 Трение

3.2.3 Напряжение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Какой-то текст

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] C. Fureby, G. Tabor, H. G. Weller, and A. D. Gosman. *Large eddy simulation of the flow around asquare prism*. AIAA Journal, 2000.
- [2] F. Nicoud and F. Ducros. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 62(3):183–200, 1999.
- [3] M. Strelets. *Detached eddy simulation of massively separated flows*. AIAA Journal, 2001.
- [4] И. А. Белов and С. А. Исаев. *Моделирование турбулентных течений*. СПб: Изд-во БГТУ, 2001.

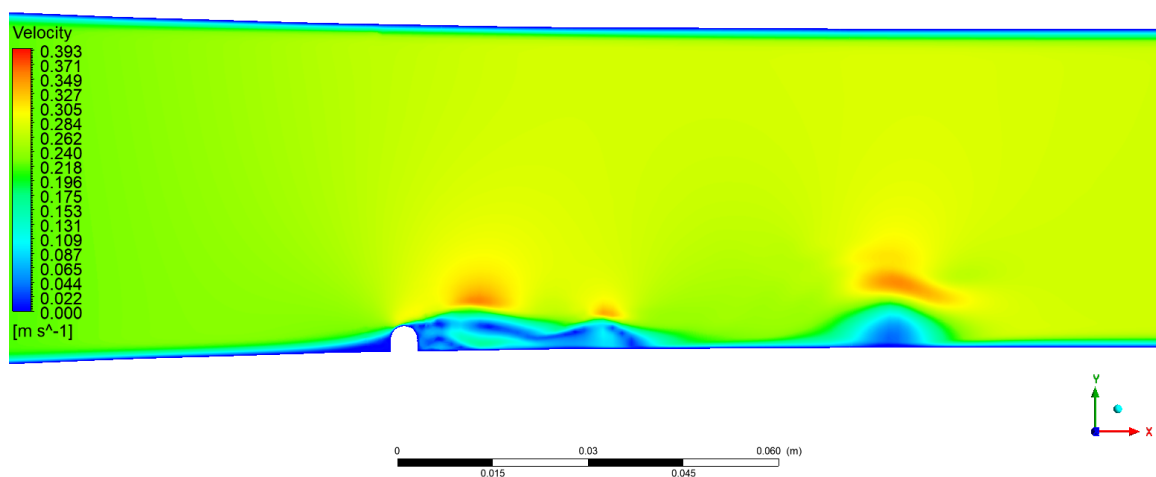


Рисунок 1: PlaneXY, $t = 0.6$ с

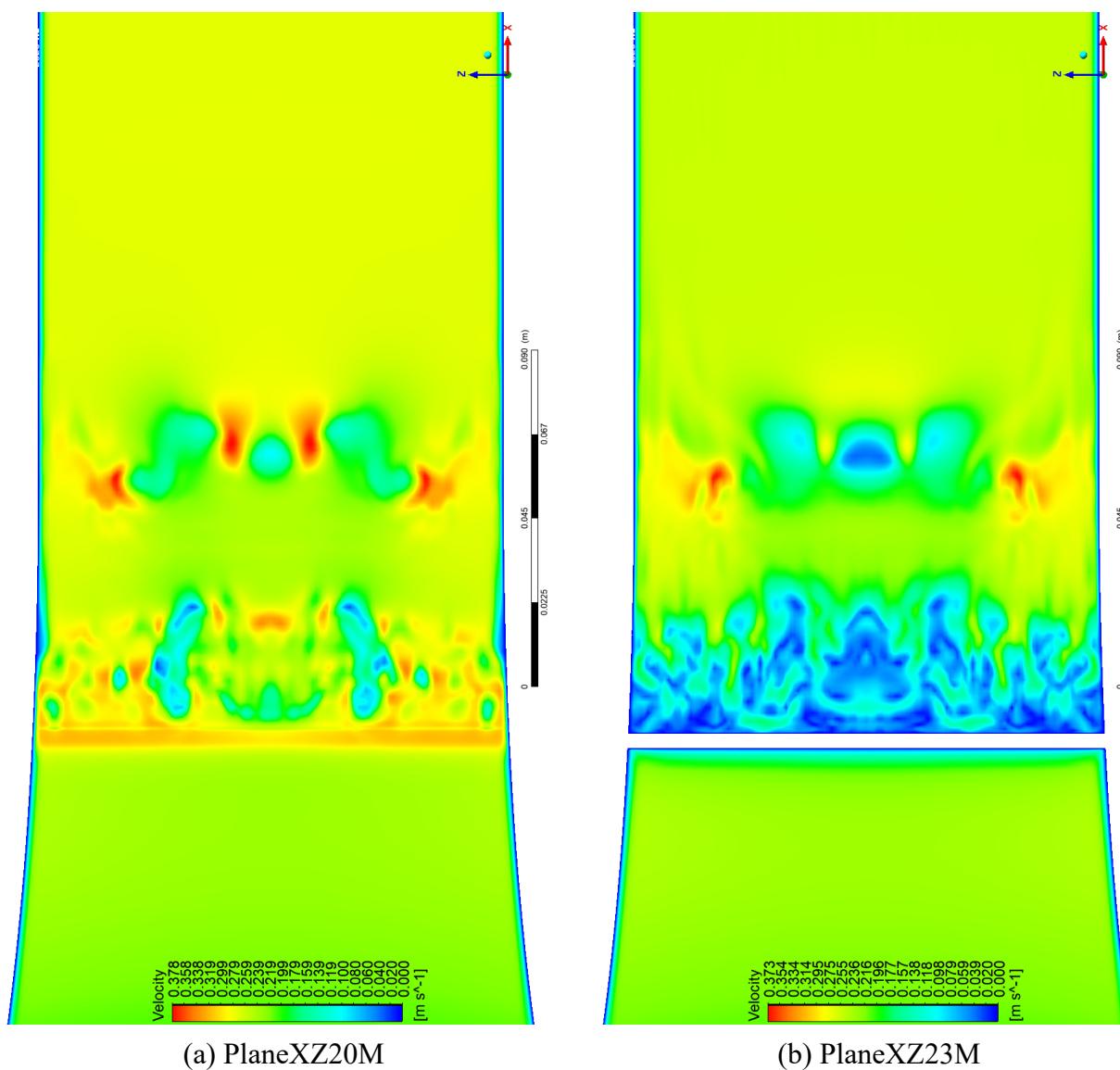


Рисунок 2: PlaneXZ, $t = 0.6$ с

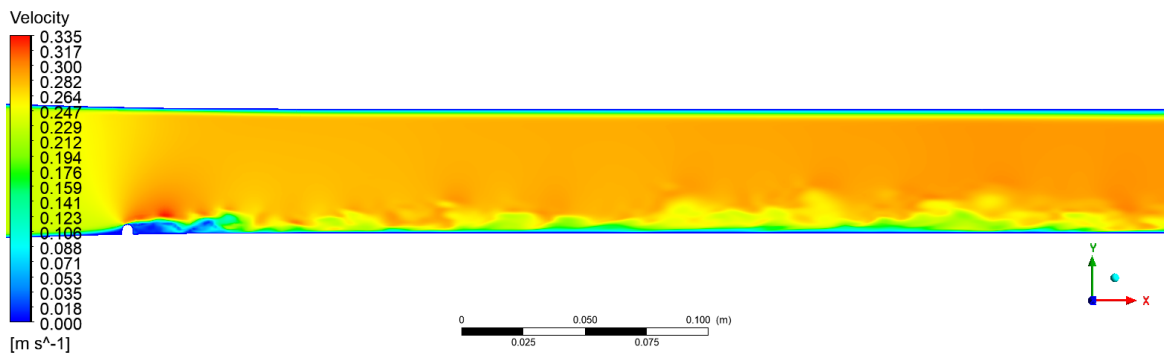


Рисунок 3: PlaneXY, $t = 10.6$ с

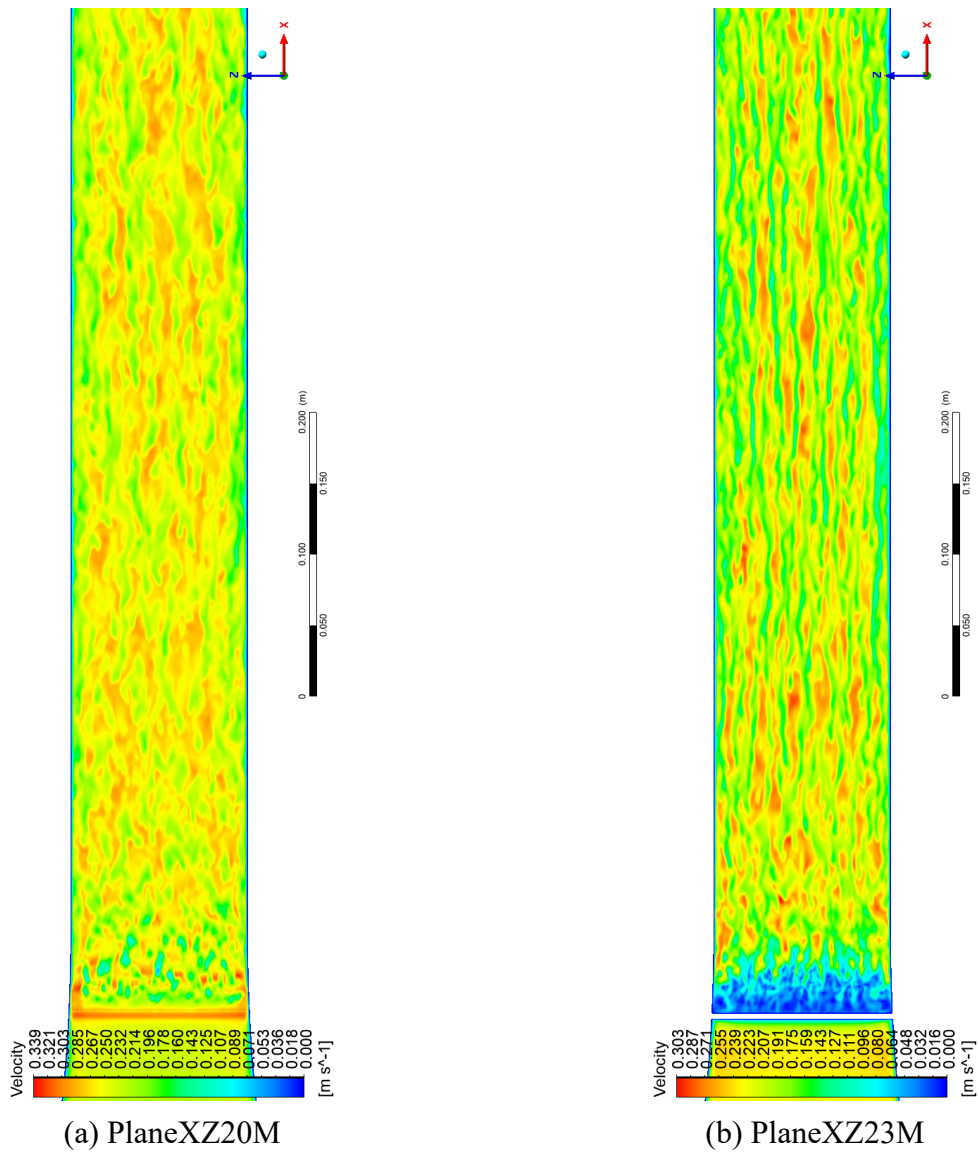


Рисунок 4: PlaneXZ, $t = 10.6$ с

