

**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

<b>ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>2</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>ГЛАВА 1 Теория .....</b>	<b>4</b>
1.1 Структура пограничного слоя .....	4
1.1.1 Внешняя область .....	5
1.1.2 Внутренняя область .....	6
1.1.3 Свойства пограничного слоя .....	7
1.2 Турбулентное состояние пограничного слоя .....	8
1.3 Локальное трение и перенос .....	9
1.4 Методы моделирования .....	9
1.4.1 DNS .....	10
1.4.2 RANS .....	11
1.4.3 LES .....	12
1.4.4 DES .....	14
1.4.5 Оценка производительности .....	15
<b>ГЛАВА 2 Использование ANSYS .....</b>	<b>17</b>
2.1 Постановка задачи .....	17
2.2 Визуализация поставленной задачи .....	17
2.2.1 Геометрия канала .....	17
2.2.2 Построение сеточной модели .....	18
2.3 Вычисление в ANSYS Fluent .....	21
<b>ГЛАВА 3 Анализ полученных данных .....</b>	<b>22</b>
3.1 Обработка данных .....	22
3.2 Влияние на локальное трение и перенос .....	23
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>24</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>25</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>26</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В .....</b>	<b>28</b>

## 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

## 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.

В данной работе рассмотрено влияние 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.

# ГЛАВА 1

## Теория

### 1.1 Структура пограничного слоя

Пограничный слой – область течения вязкой жидкости (газа) 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).

Понятие пограничного слоя впервые использовано Людвигом Прандтлем в статье, представленной 12 августа 1904 г., на третьем Международном конгрессе математиков в Гейдельберге, Германия. Для описания пограничного слоя используются уравнения Навье-Стокса:

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

Введение этого понятия существенно упростило уравнения моделирования течения жидкости (газа) путём разделения потока на две области. 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.

В турбулентном пограничном слое обычно выделяется несколько областей: внешняя и внутренняя. Они отличаются друг от друга разными масштабами вихревых структур[3].

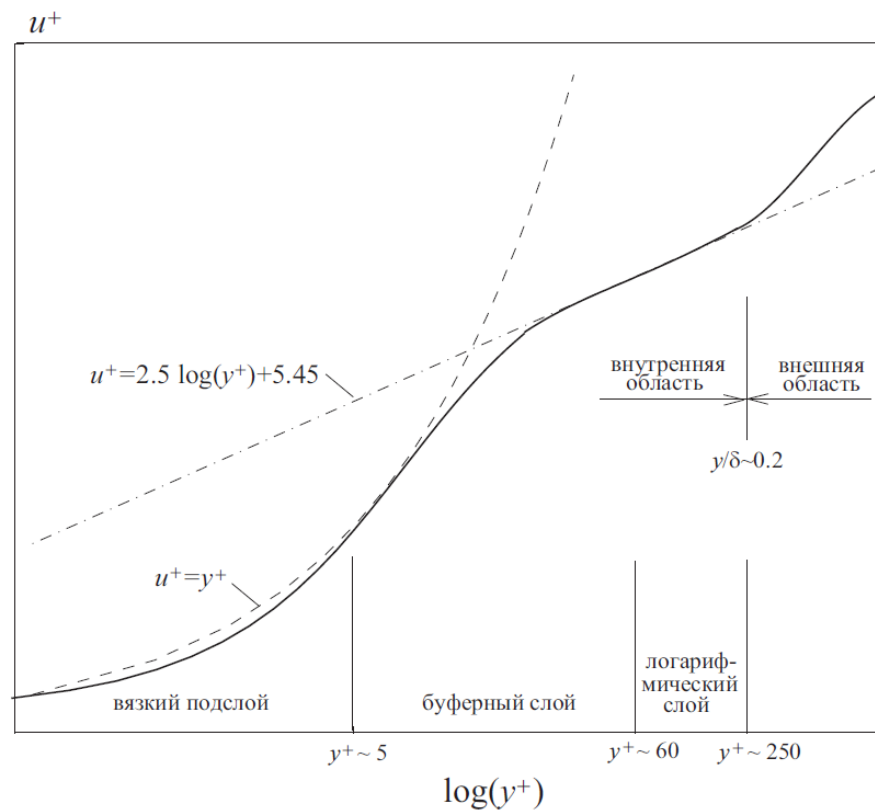


Рисунок 1.1: Схема слоя

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.

### 1.1.1 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 рассто-

янии, 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.

### 1.1.2 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).

### 1.1.3 Свойства пограничного слоя

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

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

Кроме того используется безразмерный параметр  $H$ :

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

Число Рейнольдса характеризуется двумя величинами ( $Re_x$  и  $Re_\theta$ ): расстоянием от начала  $x$  и толщиной  $\theta$ .

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

Используя напряжение трения на стенке  $\tau_w$  можем вычислить коэффициент трения  $C_F$  и динамическую скорость  $u_\tau$ :

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

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  $\kappa$ , скорость закачки и откачки жидкости(газа), 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 это-



го 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.

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

## 1.2 Турбулентное состояние 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 или газа, 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 бо-

лее крупным, но эта флуктуация компенсируется более интенсивной передачей энергии по каскаду в другие моменты времени.

### 1.3 Локальное трение и перенос

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  $\tau_w$ , коэффициент трения  $C_F$  и динамическая скорость  $u_\tau$ . Профили компонент средней скорости и их пульсаций представлены в безразмерных координатах  $u^+$  и  $y^+$ :

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

### 1.4 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 или газа), 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.

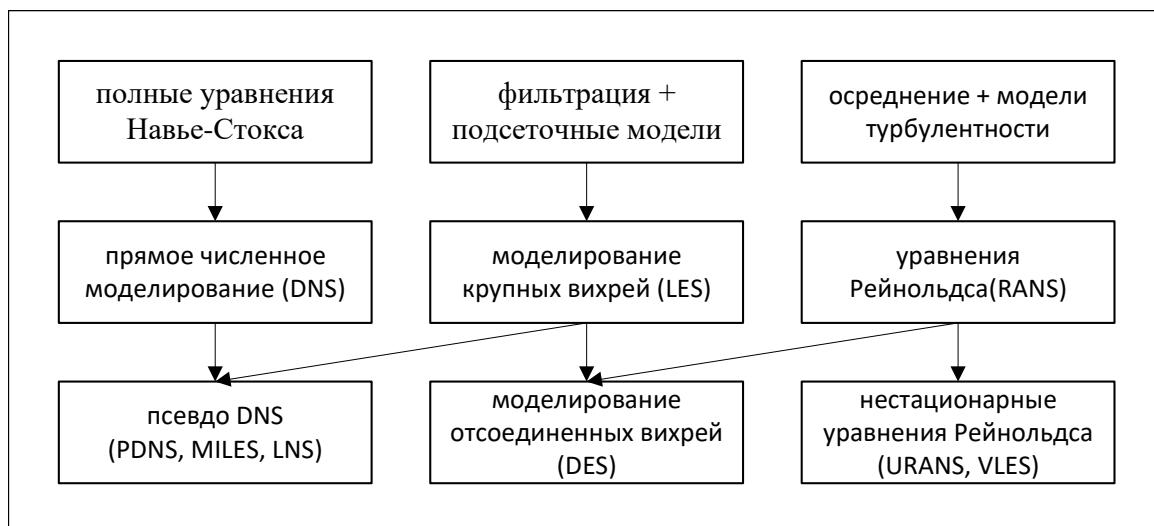


Рисунок 1.2: Виды методов по уравнениям

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.

#### 1.4.1 DNS

Прямое численное моделирование (DNS) предполагает решение полных нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса, позволяющее получить мгновенные характеристики турбулентного потока. Проблемы, связанные 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	$6.6 \times 10^3$	$2.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^6$
Кол-во узлов сетки	$2 \times 10^6$	$4 \times 10^7$	$3 \times 10^8$	$1.5 \times 10^9$
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

#### 1.4.2 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:

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

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

### 1.4.3 LES

Метод моделирования крупных вихрей (LES) был предложен Иосифом Смагоринским в 1963 году. Он основан на двух предположениях. Первый пред-

полагает, 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  $f(x)$  - исходный вариант,  $\tilde{f}(x)$  - после фильтрации.

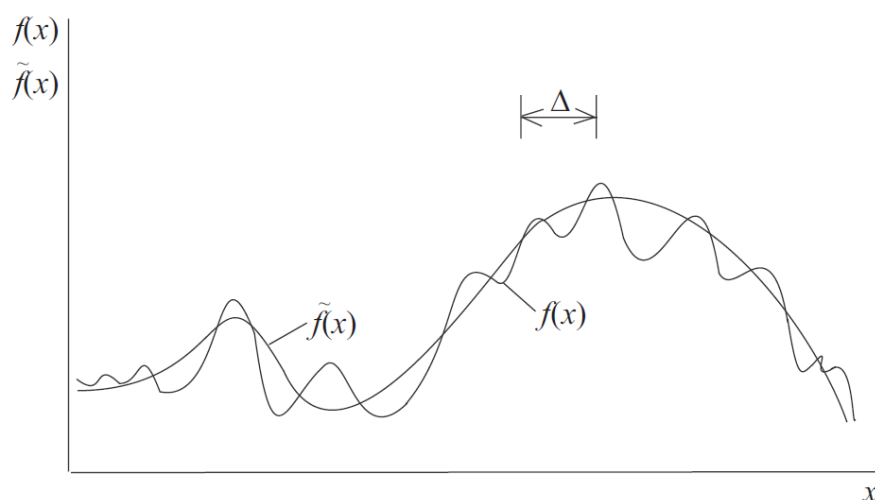


Рисунок 1.3: Исключение мелкомасштабных движений фильтрацией

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.

#### 1.4.4 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[2].

Как следует из названия метода DES, он создавался для расчета отрывных

течений. Именно такие течения лучше других подходят для этого метода. Во-первых, наличие массивованного 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.

#### 1.4.5 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) затра-



тит  $10^7$  секунд. Для проведения расчета за 100 минут потребуется компьютер с производительностью 0.1 ТФлопс.

## ГЛАВА 2

### Использование ANSYS

#### 2.1 Постановка задачи

Начальная скорость на входе в канал  $U_0 = 0.261$  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  $\tau$  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

##### 2.2.1 Геометрия канала

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

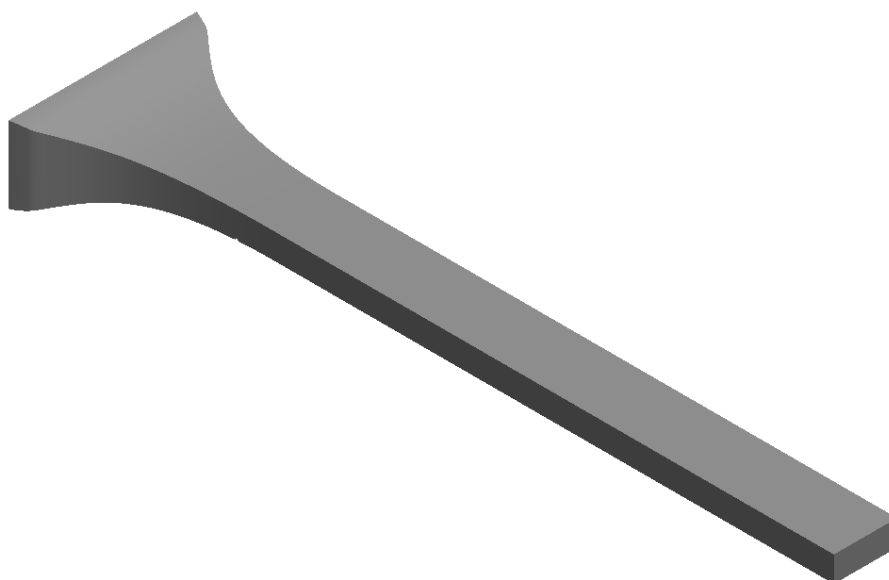


Рисунок 2.1: Общий вид канала

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.

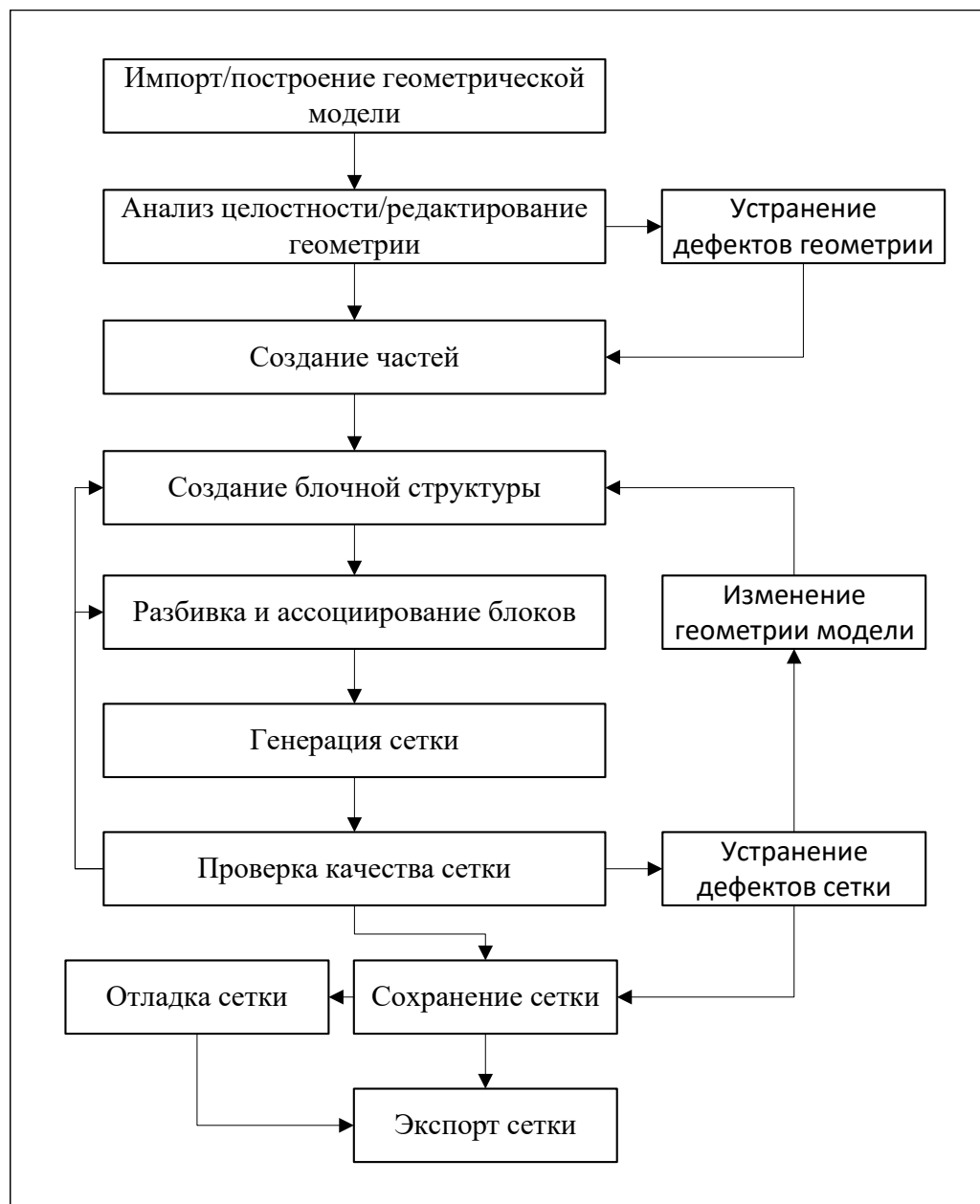


Рисунок 2.3: Схема работы над сеточной моделью

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.

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

## ГЛАВА 3

### Анализ полученных данных

#### 3.1 Обработка данных

Для анализа влияния вихрегенераторов на локальное трение и перенос использовались сечения представленные на рисунке 3.1.

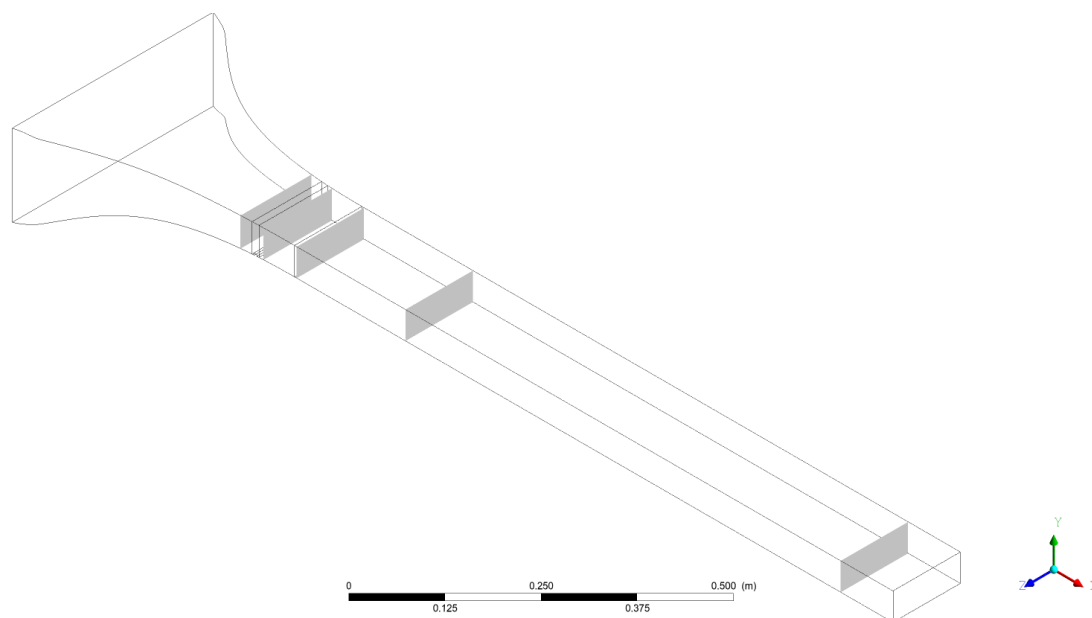


Рисунок 3.1: Сечения для анализа

Начало координатный осей расположено в центре входа канала. В таблице представлен перечень сечений, расположение и их описание.

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

Изображения в приложениях имеют названия исходя из таблицы.

### **3.2 Влияние на локальное трение и перенос**



## **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] M. Strelets. *Detached eddy simulation of massively separated flows*. AIAA Journal, 2001.
- [3] И. А. Белов and С. А. Исаев. *Моделирование турбулентных течений*. СПб: Изд-во БГТУ, 2001.

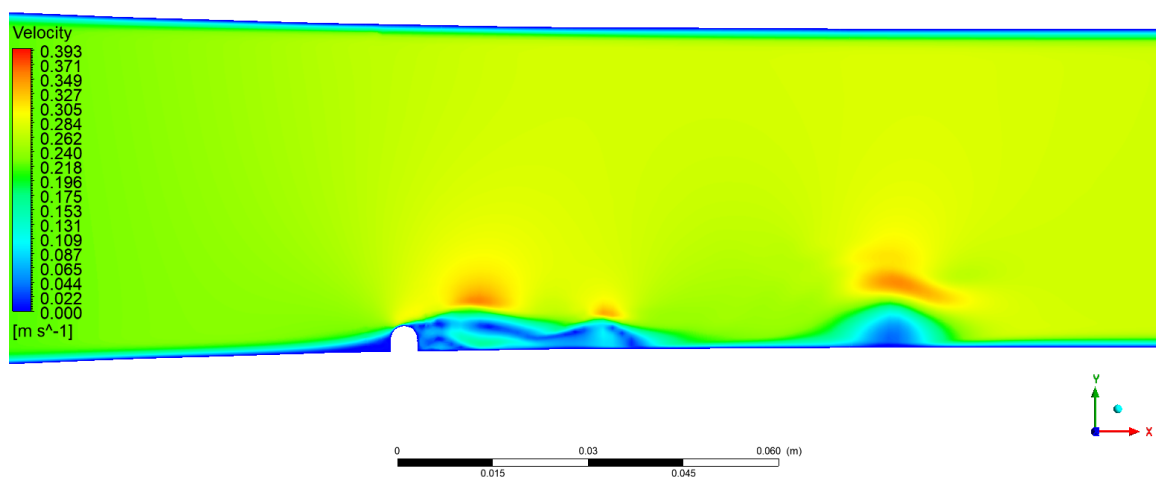


Рисунок 1: PlaneXY,  $t = 0.6$  с

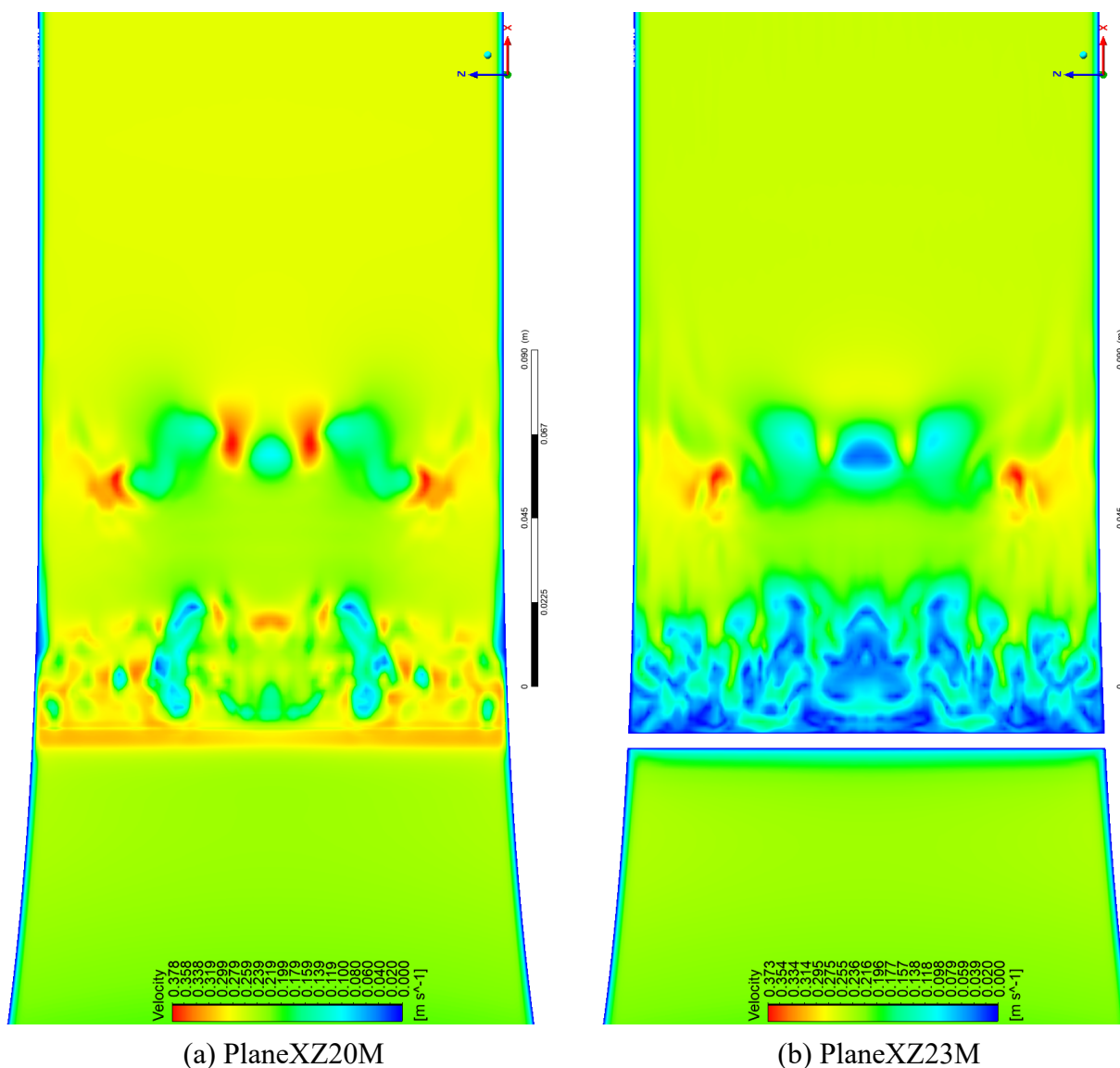


Рисунок 2: PlaneXZ,  $t = 0.6$  с





