

MESH

Виды сеток

Отличие между y^+ и y^*

Насколько мелкой должна быть сетка?

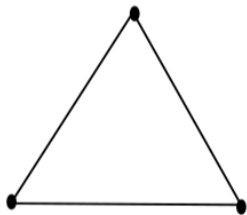
Inflation Layers

Программы для генерации сеток

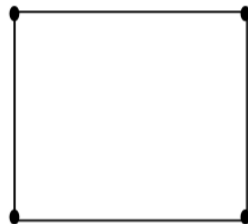
Полезные ссылки

Виды сеток

Grid Topologies



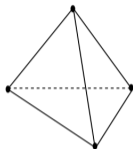
Triangle



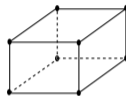
Quadrilateral

Рис.: 2D Cell Types

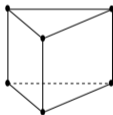
Grid Topologies



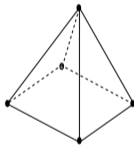
Tetrahedron



Hexahedron



Prism/Wedge



Pyramid

Рис.: 3D Cell Types

Grid Topologies

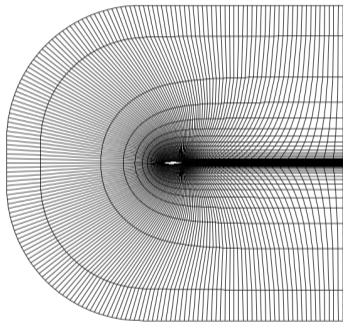


Рис.: Structured Quadrilateral Grid for an Airfoil

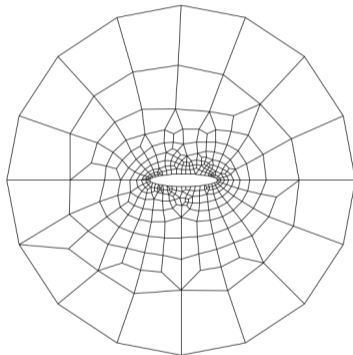


Рис.: Unstructured Quadrilateral Grid

Grid Topologies

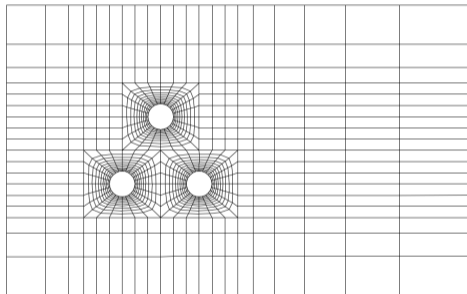


Рис.: Multiblock Structured Quadrilateral Grid

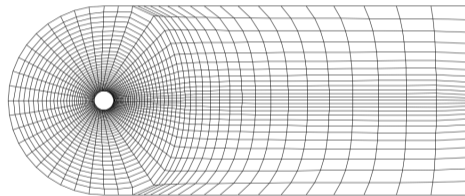


Рис.: O-Type Structured Quadrilateral Grid

Grid Topologies

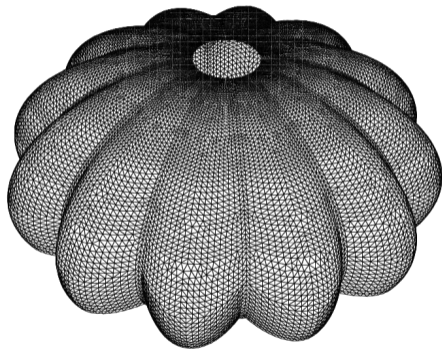


Рис.: Parachute Modeled With Zero-Thickness Wall

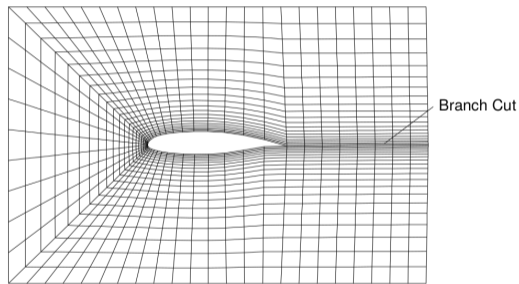


Рис.: C-Type Structured Quadrilateral Grid

Grid Topologies

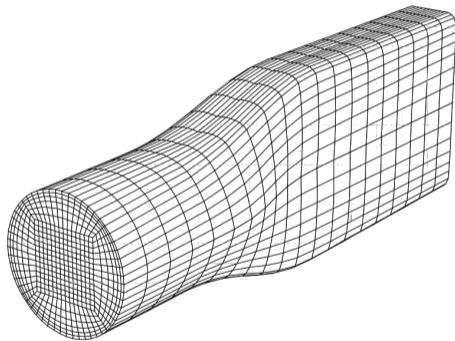


Рис.: 3D Multiblock Structured Grid

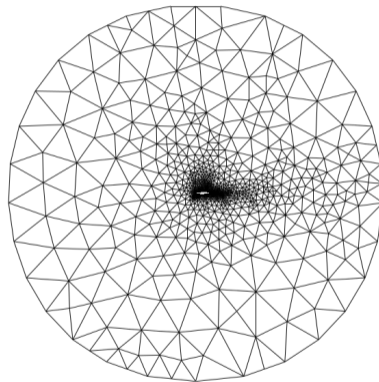


Рис.: Unstructured Triangular Grid for an Airfoil

Grid Topologies

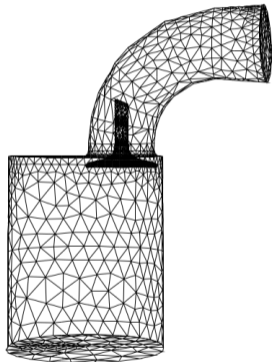


Рис.: Unstructured Tetrahedral Grid

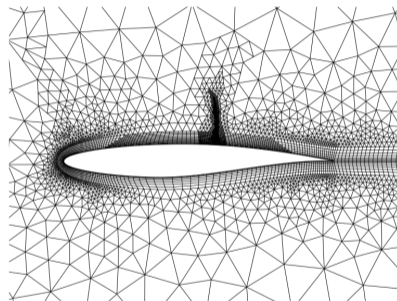


Рис.: Hybrid Triangular/Quadrilateral Grid with Hanging Nodes

Grid Topologies

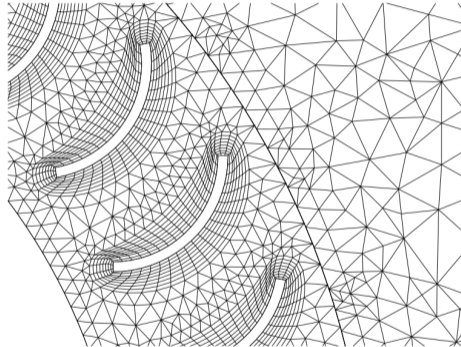
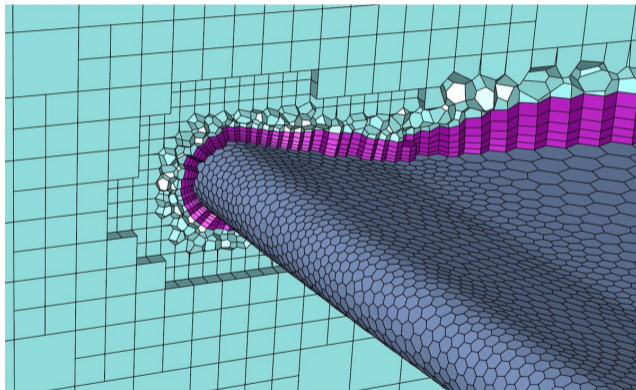


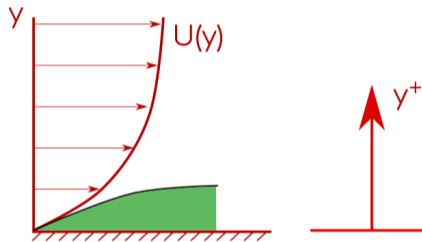
Рис.: Non-Conformal Hybrid Grid for a Rotor-Stator Geometry

Мозаичная полиэдральная сетка

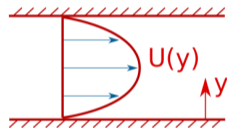
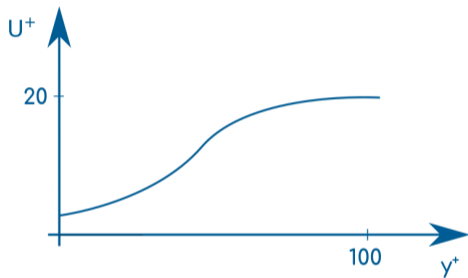


Отличие между y^+ и y^*

Безразмерная высота y^+



$$y^+ = \frac{\rho y u_\tau}{\mu} \quad (1)$$

Безразмерная высота y^+ 

- ▶ Экспериментальные данные и DNS говорят об универсальной форме развитого пограничного слоя. Это можно использовать для проверки развития пограничного слоя в CFD.

u_τ

$$y^+ = \frac{\rho y u}{\mu} \quad (2)$$

- ▶ Какую скорость использовать в качестве масштаба?
- ▶ Скорость на стенке равна нулю $u_w = 0$.
- ▶ В основном потоке u_∞ , не имеет связи с пограничным слоем, за исключением Re_d .
- ▶ Используют скорость u_τ , основанную на напряжении сдвига или турбулентной кинетической энергии:

$$u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho} = \sqrt{C_\mu^{1/2} k_P} \quad (3)$$

u_τ

- ▶ Когда u_τ вычисляется по τ_w используется y^+ .
- ▶ Когда u_τ вычисляется по k_p используется y^* .

$$y^+ = \frac{\rho y \sqrt{\tau_w / \rho}}{\mu} \quad (4)$$

$$y^* = \frac{\rho y \sqrt{C_\mu^{1/2} k_p}}{\mu} \quad (5)$$

y^+

- ▶ используется исторически для пограничного слоя на пластине, т.к. τ_w можно оценить из перепада давления.
- ▶ т.к. имеется два уравнения и два неизвестных:

$$y^+ = \frac{\rho y \sqrt{\tau_w / \rho}}{\mu} \quad (6)$$

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \nu \left(\frac{y^+}{1/\kappa \log(Ey^+)} \right) \frac{u_P}{y_P} \quad (7)$$

- ▶ Нужны итерации для каждой ячейки пограничного слоя, что дорого в плане вычислений.

y^+

- ▶ Итерационная схема:

$$\nu \left(\frac{y^+}{1/\kappa \log(Ey^+)} \right) \frac{u_P}{y_P} - \left(\frac{y^+ \nu}{y_P} \right)^2 = 0 \quad (8)$$

- ▶ После преобразований:

$$\frac{u_P y_P \kappa}{\nu} - y^+ \log(Ey^+) = 0 \quad (9)$$

$$f(y^+) = 0 \quad (10)$$

y^*

- ▶ В точке торможения или отрыва $\tau_w = 0 \Rightarrow y^+ = 0$
- ▶ Лаундер и Сполдинг предложили в общем виде использовать y^* (не только плоская пластина).
- ▶ В большинстве случаев $y^+ \sim y^*$

$$y^* = \frac{\rho y \sqrt{C_\mu^{1/2} k_P}}{\mu} \quad (11)$$

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \nu \left(\frac{y^*}{1/\kappa \log(Ey^*)} \right) \frac{u_P}{y_P} \quad (12)$$

- ▶ Итерации не требуются! Вычисляем y^* используя k_P , затем τ_w .

- ▶ Вычисляем y^+ и y^* .
- ▶ Вычисляем кинематическую вязкость на стенке:

$$\nu_w = \begin{cases} \nu, & y^+ < 11.25 \\ \nu \frac{y^+}{\frac{1}{\kappa} \log(Ey^+)}, & y^+ > 11.25 \end{cases} \quad (13)$$

- ▶ Вычисляем τ_w

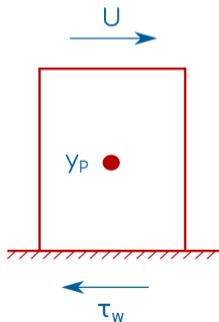
$$\frac{\tau_w}{\rho} = \nu_w \frac{u_P}{y_P} \quad (14)$$

- ▶ Fluent и CFX используют только y^* .

Насколько мелкой должна быть сетка?

- Для обеспечения корректности вычисления сдвиговых напряжений необходимо оценить:

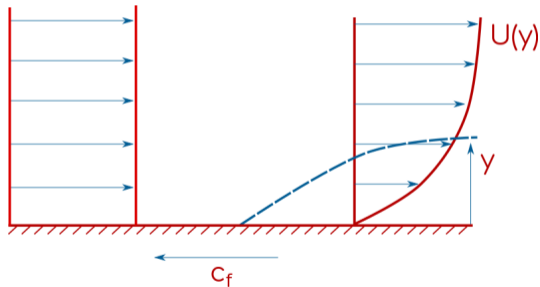
$$y^+ : \begin{cases} y^+ < 5 & \text{вязкий подслои} \\ 30 < y^+ < 200, & \text{логарифмическая область} \end{cases} \quad (15)$$



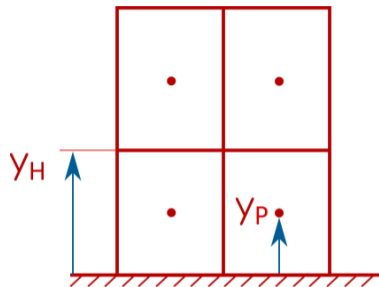
$$y^+ = \frac{\rho u u_\tau}{\mu} \quad (16)$$

$$u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho} = \sqrt{C_\mu^{1/2} k_P} \quad (17)$$

- ▶ Насколько мелкой должна быть ячейка y_P ?
- ▶ τ_w ещё неизвестно.
- ▶ Первоначальное предположение: рассмотрим плоскую пластину:



1. Вычисляем $Re_L = \frac{\rho u L}{\mu}$.
2. Вычисляем $c_f = [2 \log_{10}(Re_L) - 6.5]^{-2.3}$ или по другой формуле, наиболее соответствующей расчётному случаю.
3. Вычисляем $\tau_w = \left(\frac{1}{2} \rho u^2\right) c_f$.
4. $u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$.
5. $y_P = \frac{y^+ \mu}{\rho u_\tau}$
6. $y_P = y_H / 2$



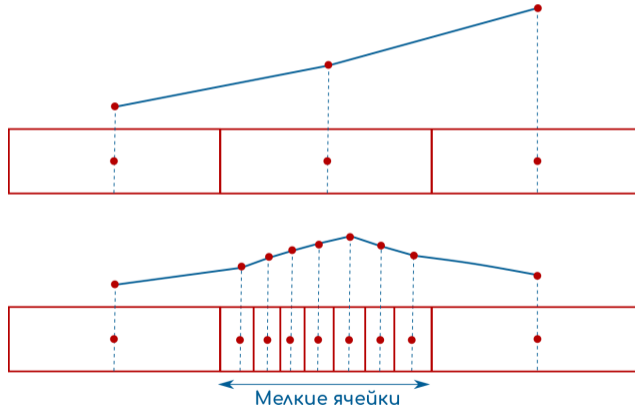
- ▶ Это начальное приближение.
- ▶ Далее в процессе расчёта уменьшаем сетку, если необходимо.

Inflation Layers

Overview

- ▶ Для чего использовать сжатие в CFD?
- ▶ Как выбрать необходимое количество слоёв N и степень сжатия G ?
- ▶ Почему объём переходных ячеек от последнего слоя со сжатием к ядру потока должен быть маленьким?

- ▶ В CFD переменные потока изменяются линейно от ячейки к ячейке.
- ▶ В областях с большими градиентами скорости, температуры и т.п. необходима мелкая сетка, чтобы корректно разрешить данные градиенты.



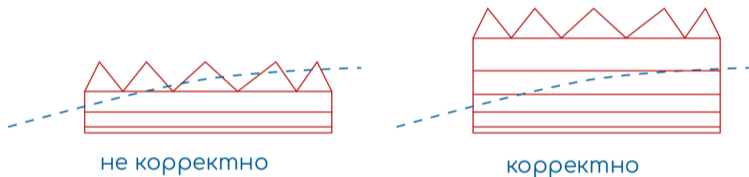
- ▶ Пограничный слой: $\frac{\partial U}{\partial x} \ll \frac{\partial U}{\partial y}$
- ▶ Для разрешения градиентов размер ячеек должен быть меньше по нормали к стенке, чем вдоль неё (RANS).
- ▶ В реальных геометриях чаще всего неструктурированные сетки.
- ▶ Данные сетки достаточно крупны вблизи стенок.
- ▶ Можно использовать **Inflation Layers (Prism Layers)** по неструктурированной сеткой.
- ▶ Мешеры часто строят **Inflation Layer** автоматически. Задаются:
 - ▶ Высота первого слоя y_H .
 - ▶ Число слоёв N .
 - ▶ Сжатие-геометрический рост G .

Высота первого слоя y_H

- ▶ Задаётся значением y^+ .
- ▶ Предыдущий раздел лекции.

Общая высота слоя

- ▶ δ пограничного слоя должна полностью помещаться внутри **Inflation Layer**.



- ▶ \Rightarrow Необходима формула для оценки высоты пограничного слоя.
- ▶ Затем проверяем лежит ли δ внутри **Inflation Layer**.

Два слоя



$$y_T = y_H + y_H \cdot G$$

- ▶ G - степень сжатия (геометрический рост).
- ▶ $G > 1 \Rightarrow$ каждый последующий слой больше предыдущего.

Три слоя и N слоёв

$$y_T = y_H + y_H \cdot G + y_H \cdot G^2$$

- ▶ Для N слоёв.

$$y_T = y_H + y_H \cdot G + y_H \cdot G^2 + \dots + y_H \cdot G^{N-1}$$

$$y_T = \sum_{k=0}^{N-1} y_H \cdot G^k = y_H \frac{1 - G^N}{1 - G}$$

- ▶ Имеется две независимые переменные G и N .



Толщина пограничного слоя

- ▶ Необходимо чтобы δ пограничного слоя полностью помещалась внутри **Inflation Layer**.

$$\delta = y_T$$

$$\delta = y_H \frac{1 - G^N}{1 - G}$$

Толщина пограничного слоя

- ▶ Можно использовать эмпирические соотношения для δ . На пример *Cendel* и *Cimbala*(2006):

$$\delta = \frac{4.91L}{\sqrt{Re_L}}, Re_L < 5 \cdot 10^5$$

$$\delta = \frac{0.38L}{Re_L^{1/5}}, Re_L > 5 \cdot 10^5$$

- ▶ или другие.

Количество слоёв

- ▶ В первом приближении можно принять:

$$N > 10, y^+ \sim 30$$

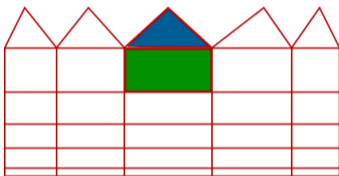
$$N > 25, y^+ \sim 1$$

- ▶ Теперь можно решить уравнение относительно G :

$$y_H \frac{1 - G^N}{1 - G} - \delta = 0$$

- ▶ Метод Ньютона-Рифсона/бисекций.
- ▶ Получим G для максимального значения отношения роста. В расчётах нужно будет уменьшить.
- ▶ Проверка сетки. В постобработчике можно отобразить поле y^+ . Если y^+ слишком большое, то необходимо уменьшить y_H .

- ▶ Объём последней ячейки в слое должен быть равен объёму ячейки в основном потоке.



Объём ячейки основного потока
=
Объём ячейки последнего слоя

- ▶ Рекомендуется $1.05 < G < 1.3$. Сильно большое сжатие может снизить точность расчётов.
- ▶ Рекомендуется проводить расчёты одной и той же задачи минимум на трёх сетках с различными y_H и G - сеточная сходимость.

Программы для генерации сеток

- ▶ **GAMBIT.** - устаревшая программа. Ограничение объём сеток не больше 4 Гб.(Коммерческий)
- ▶ **TRELIS CFD.**- дальнейшее развитие GAMBIT. (Коммерческий)
- ▶ **Ansys Meshing.** (Коммерческий)
- ▶ **Fluent with Meshing.** (Коммерческий)
- ▶ **Ansys SpaceClaim.** (Коммерческий)
- ▶ **ICEM CFD.** (Коммерческий)
- ▶ **GMESH.** <https://gmsh.info> (Свободный)
- ▶ Утилита OpenFOAMa - **SnappyHexMesh** - свободный "аналог"Fluent with Meshing.
- ▶ **LoopyCuts.** <https://github.com/mlivesu/LoopyCuts> (Свободный)
- ▶ **HybMesh.** <https://github.com/kalininei/HybMesh> (Свободный)

Полезные ссылки

- ▶ Сетки в Space Claim
 - ▶ <https://magicdpd.ru/it-is-time-for-spaceclaim-meshing/>
 - ▶ <https://magicdpd.ru/fault-tolerant-fluent-mesh/>
- ▶ Динамические сетки
 - ▶ <https://magicdpd.ru/ansys-fluent-dynamic-mesh-problem/>
- ▶ Fluent with Meshing
 - ▶ <https://magicdpd.ru/еще-раз-про-ansys-fluent-mosaic/>
 - ▶ <https://magicdpd.ru/fluid-flow-through-a-y-duct/>
 - ▶ <https://magicdpd.ru/ansys-fluent-meshing-gui/>

Полезные ссылки

- ▶ Качество сетки
 - ▶ <https://magicdpd.ru/зачем-orthogonal-quality-для-cfd/>
 - ▶ <https://www.hexalab.net> - сервис, позволяющий визуализировать и оценивать hex сетки в форматах .mesh и .vtk прямо в браузере.
- ▶ Преобразование форматов сеток
 - ▶ https://magicdpd.ru/__trashed/
 - ▶ <https://magicdpd.ru/feconv-открытый-конвертор-сеточных-формат/>