



Восьмой профессиональный слёт
разработчиков отечественных CFD кодов
«Отечественные CFD коды – 2021»
(CFD Weekend-2021)



Опыт генерации квазиструктурированных сеток на основе открытого ПО Gmsh

М.К. Ермаков

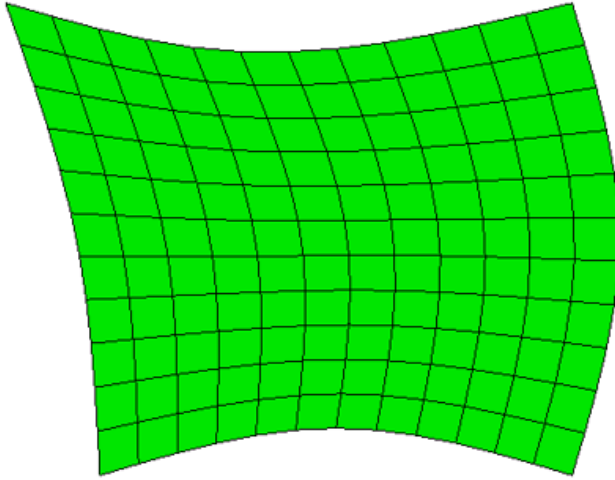
Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН
ermakov@ipmnet.ru

Москва, 18-19 декабря 2021 г.

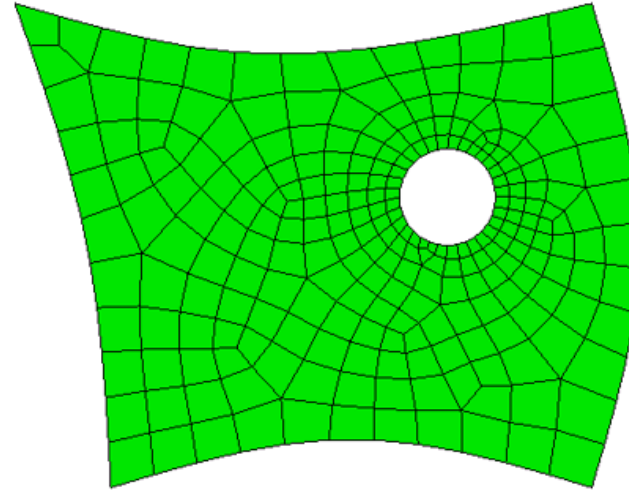
План сообщения

- Подходы к построению сеток
- Особенности открытого ПО
- Общая характеристика Gmsh
- Неструктурированные тетраэдральные сетки: новые возможности
- Гибридные квазиструктурированные сетки
 - Рекомбинация
 - Разбиение на подобласти + трансфинитные элементы
 - Выталкивание
 - Пограничный слой
- Примеры
- Fortran API

Разновидности сеток



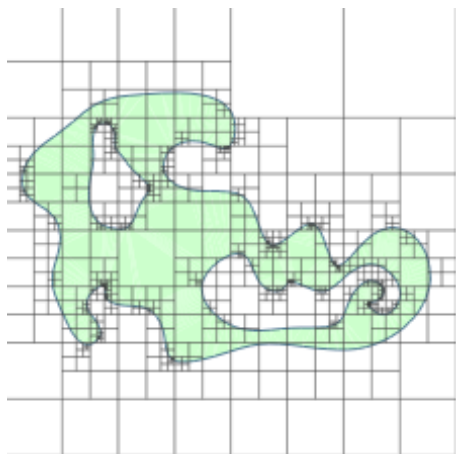
Структурированные



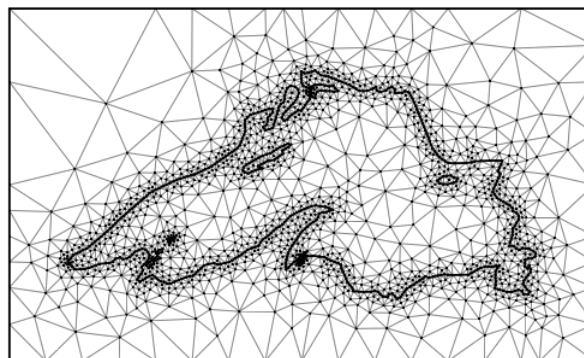
Неструктурированные

- Гибридные
- Сетки (ячейки) Вороного
- Сетки с перекрытиями («химера»)
- Анизотропные сетки
- Адаптивные сетки
- ...

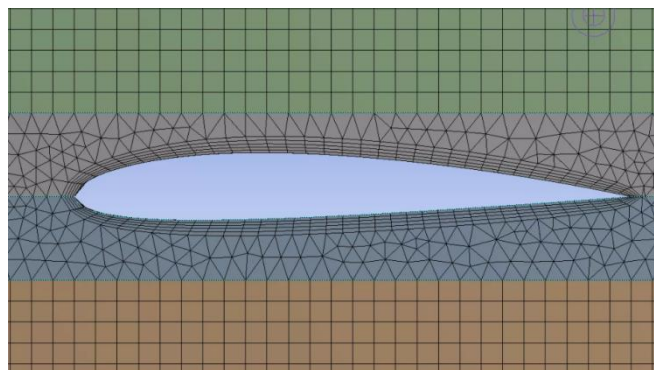
Подходы к построению сеток



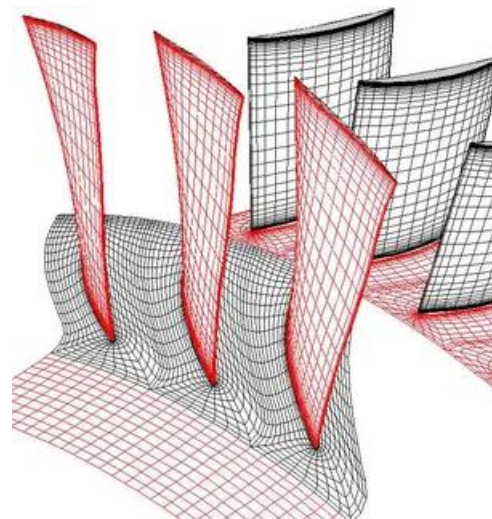
Структурированная quad-tree



Неструктурированная

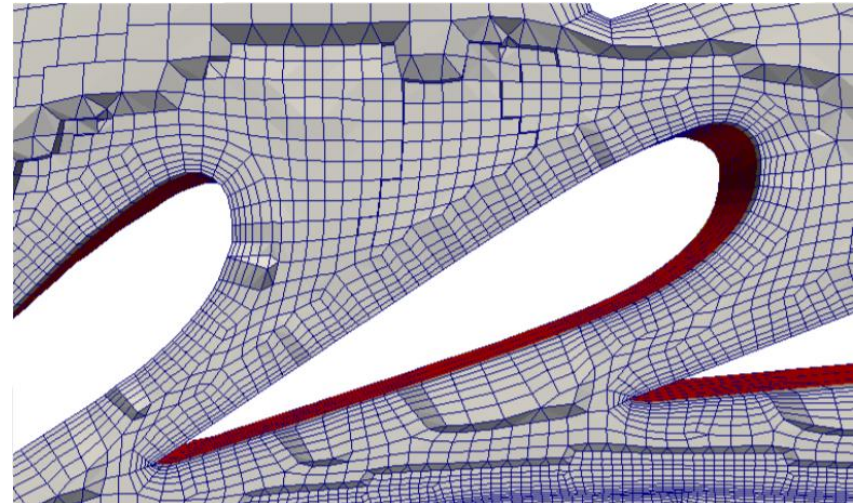
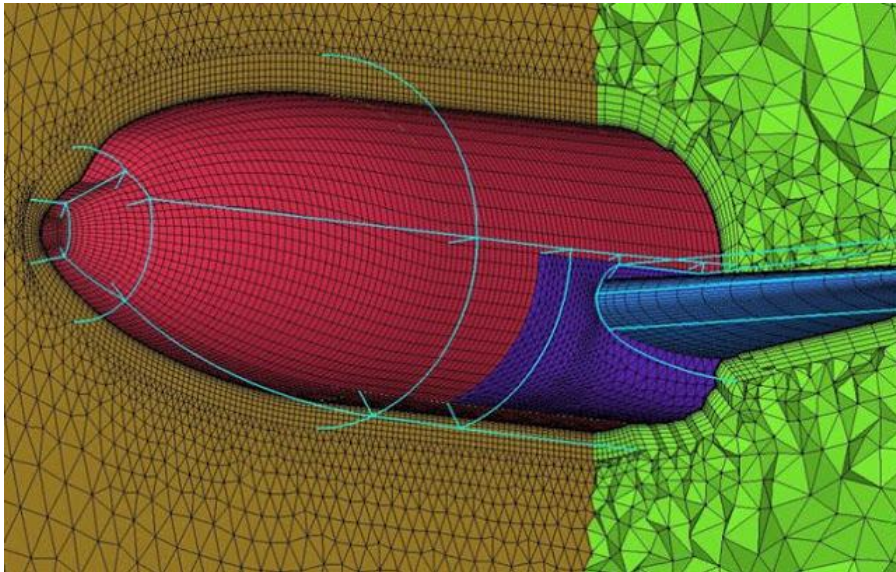
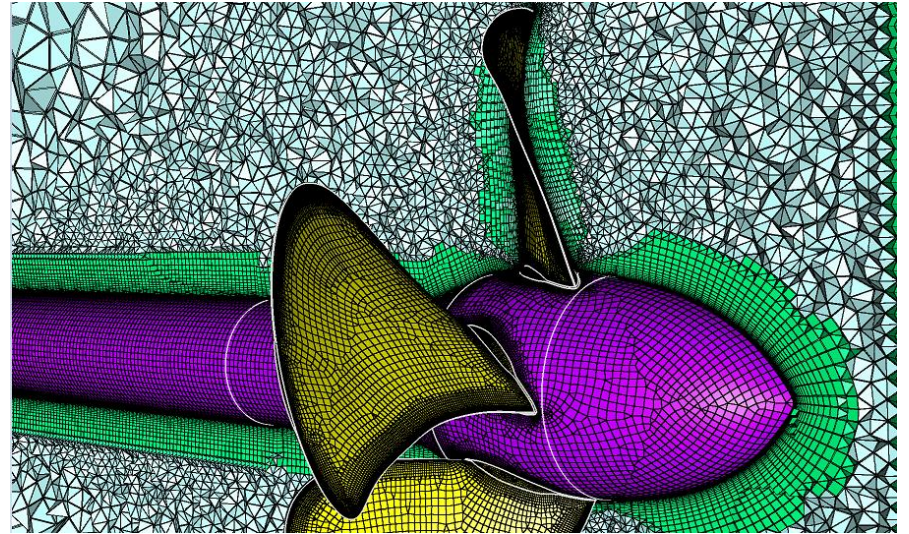
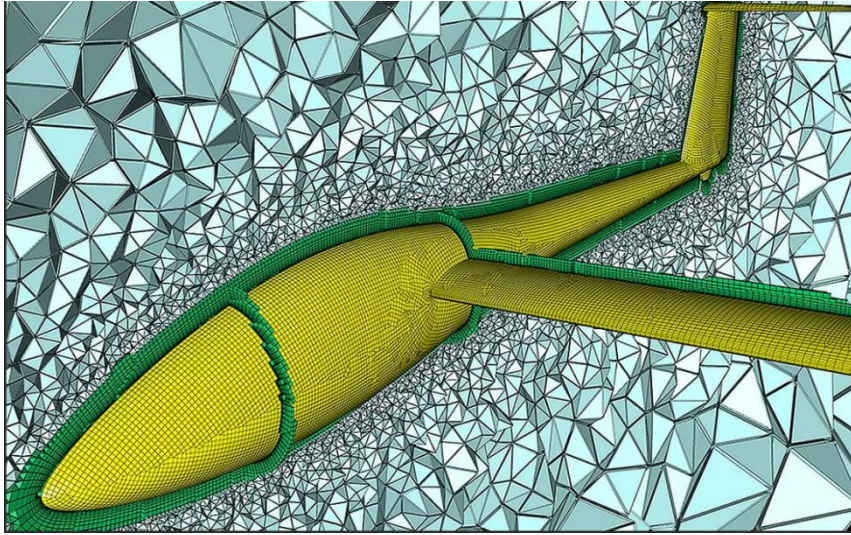


Гибридная

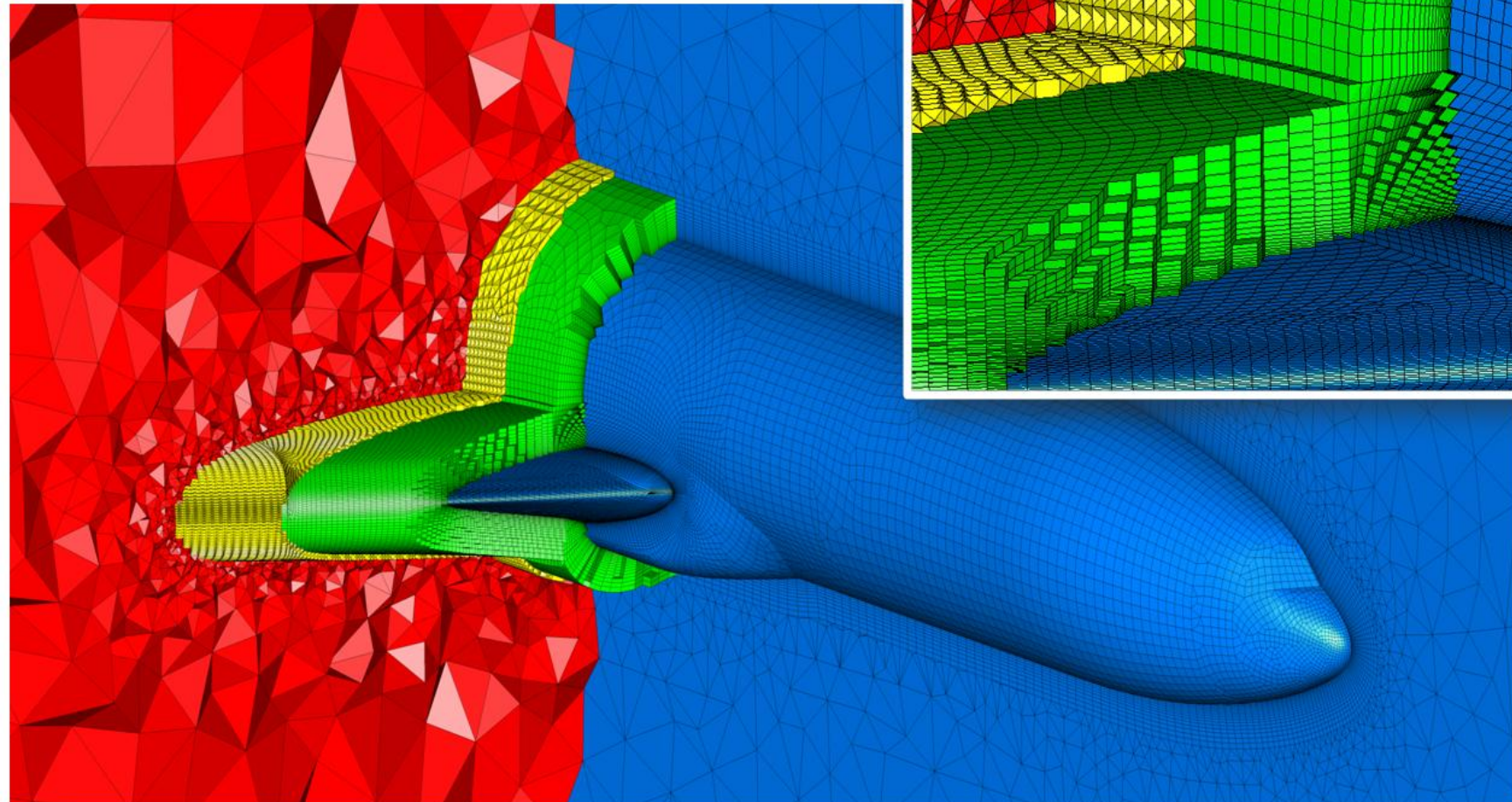
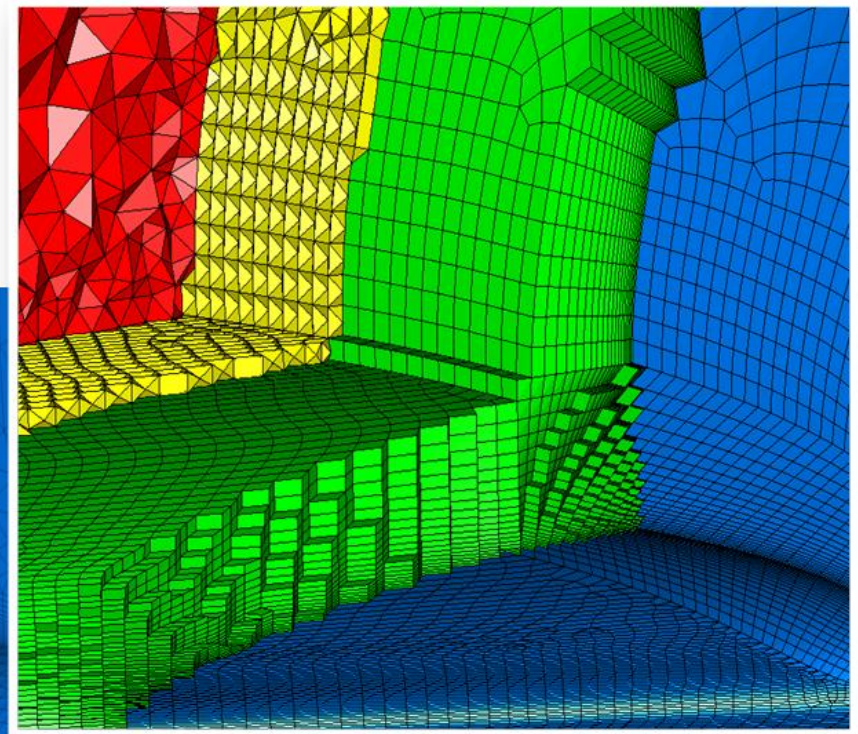


Блочнo-структурированная

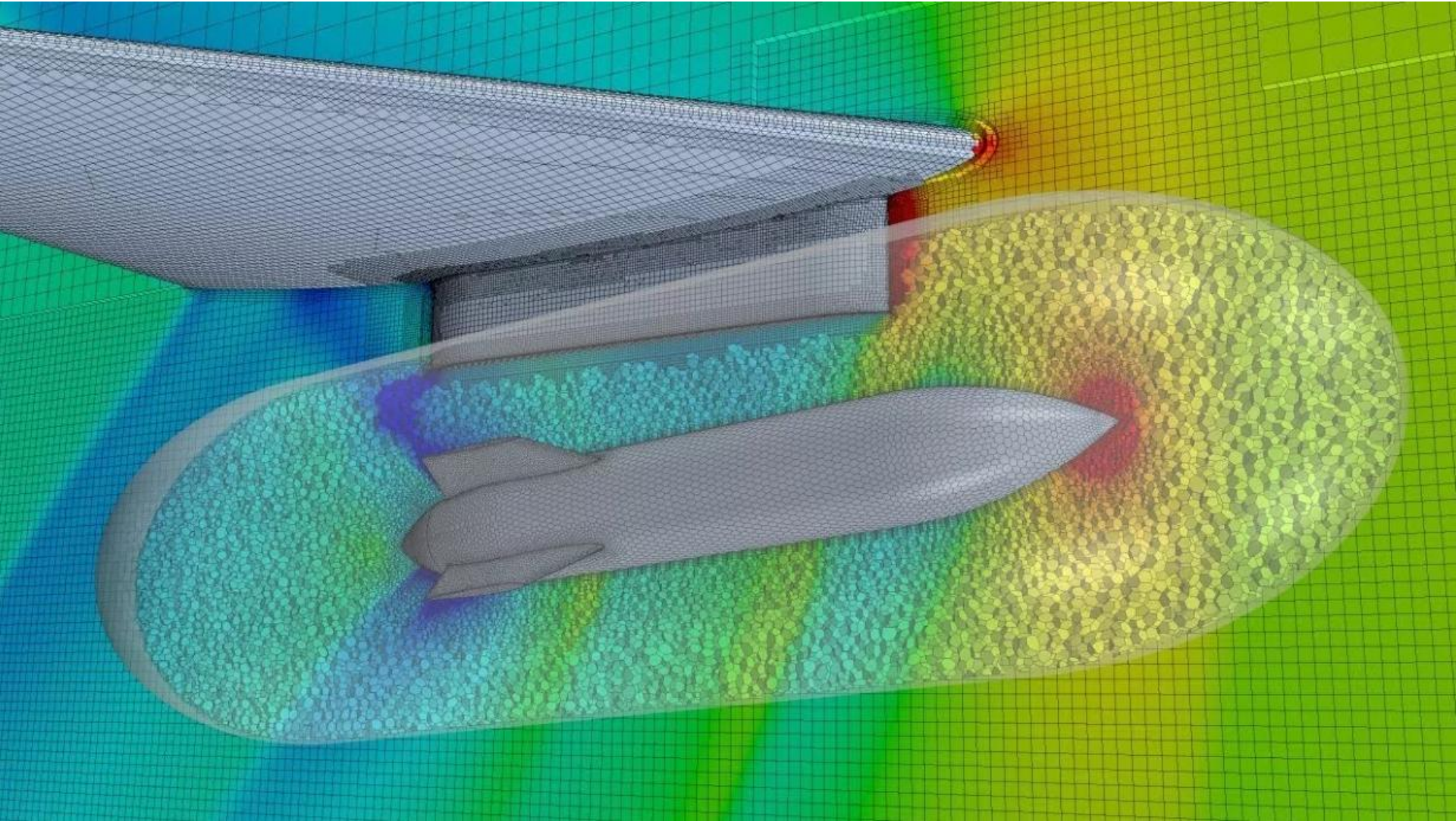
Примеры сеток



Примеры сеток



Примеры сеток



Открытое ПО

- Пакеты с трудозатратами ~ 20-100 человеко-лет (github)
- В силу доступности успешные из них становятся де-факто стандартами
- Возможность разобраться с их устройством и алгоритмами
- Возможность развития под собственные алгоритмы
- Возможность взаимодействия с разработчиками
- Кросс-платформенность
- Лицензирование только для коммерческой деятельности

Генераторы сеток известных пакетов продаются вместе со всем пакетом – это очень дорого.

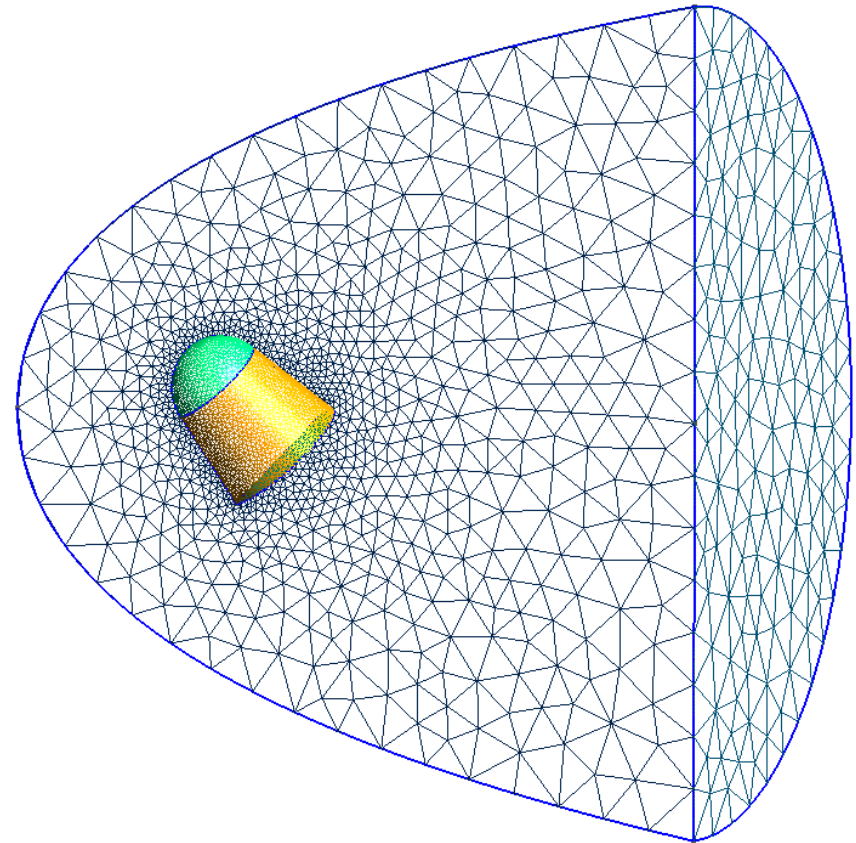
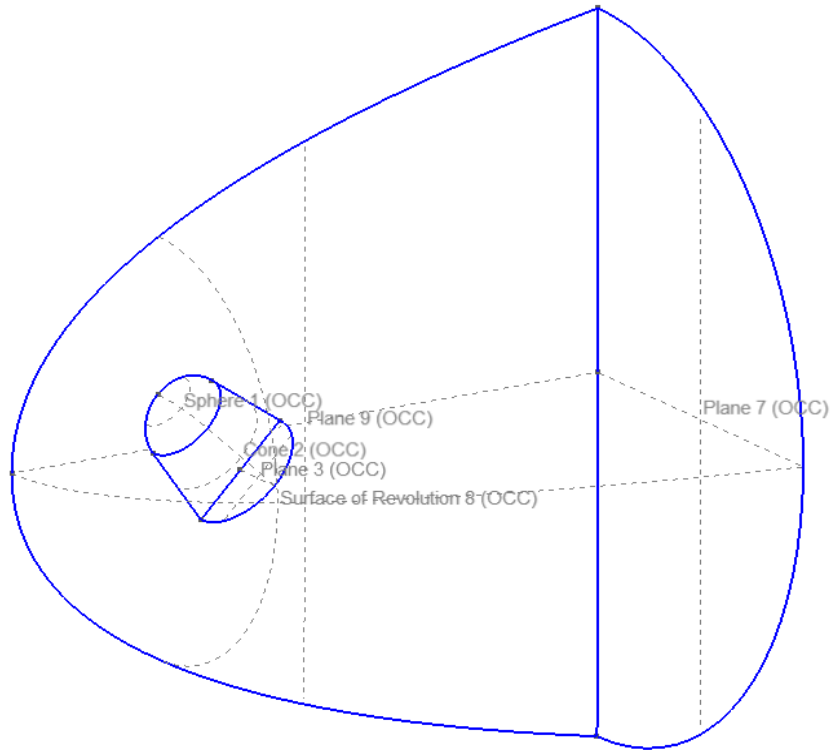
Примеры: OpenCascade, FreeCAD, Metis/Scotch, MUMPS, OpenFOAM, Salome ...

Генерация сеток: Gmsh, Netgen, Tetgen, EnGrid, BlockMesh, CGAL, PolyDualMesh, snappyHexMesh

Общая информация о Gmsh

- gmsh.info – открытый пакет построения неструктурированных (finite elements) сеток (Belgium), 4.8.4
- Geometry (CAD), Mesh, Visualisation
- Подключение солверов
- Интерактивный режим, пакетный, использование библиотек (API)
- Windows, Linux, MacOS
- Элементы высокого порядка, OpenMP
- Разработана учеными для собственного использования
- 500000 строк C++, 8000 загрузок в месяц, 500 цитирований в год
- Активная авторская разработка
- Документация (English ~ 400 с.), примеры, форум

Создание геометрии и генерация сетки



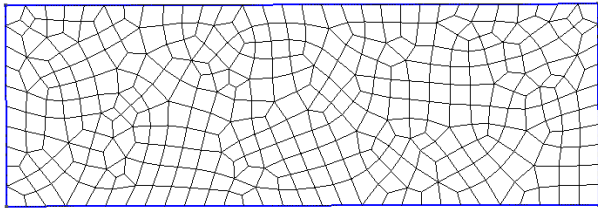
Преимущества тетраэдральных сеток:

- применима к сложным геометриям
- **полностью автоматическая генерация**
- «прощает» ошибки геометрии
- высокая скорость, оптимизация
- возможность сгущения

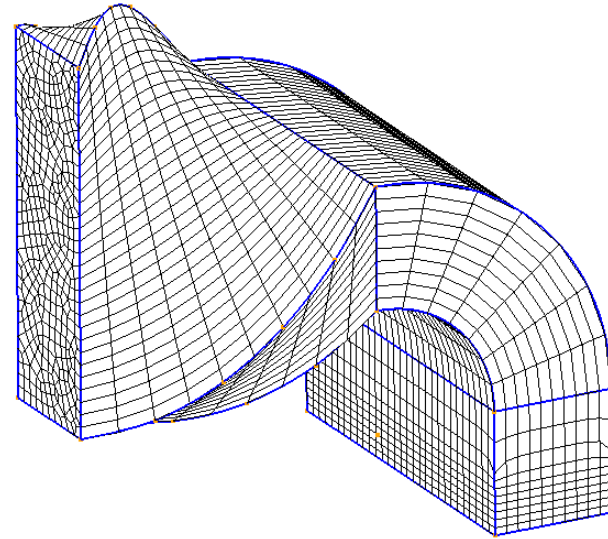
Недостатки тетраэдральных сеток:

- отсутствие ПС с анизотропными ячейками
- проблема оценки градиентов в ячейке

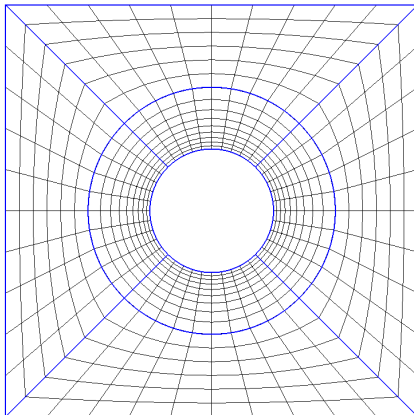
Тетраэдральные сетки -> квазиструктурированные сетки



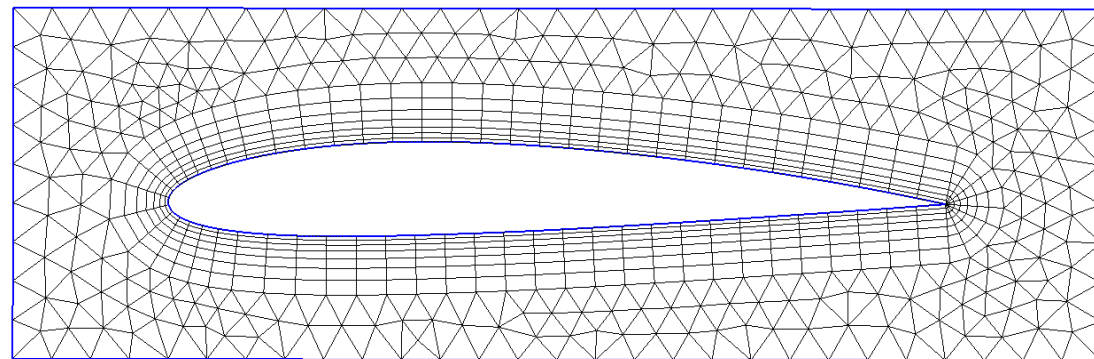
рекомбинация



выталкивание (экструзия)

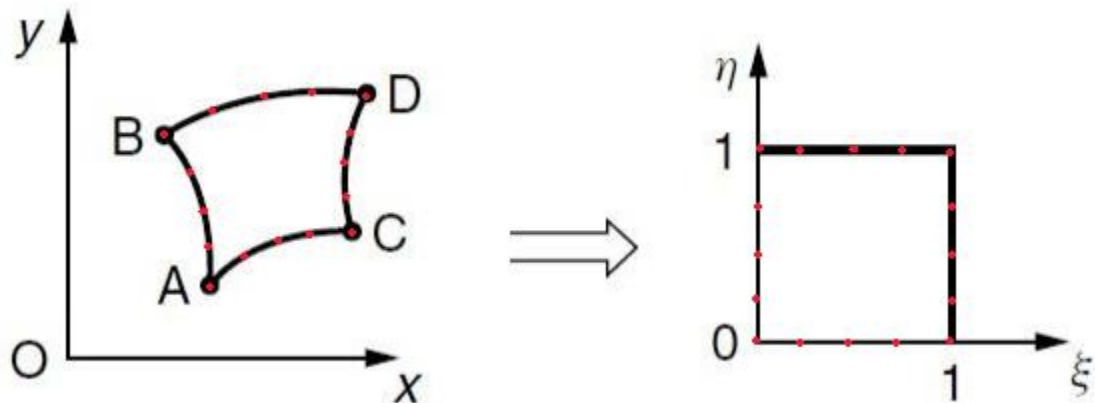


разбиение области +
трансфинитные сетки



пограничный слой – NASA 2412

Трансфинитная интерполяция : 2D

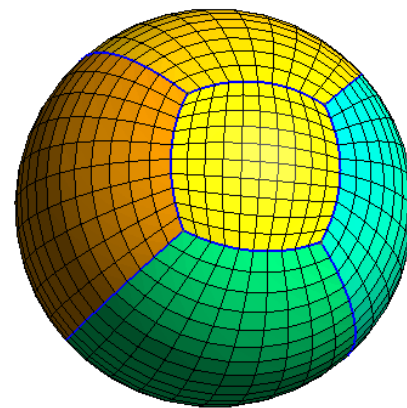


$$\begin{aligned}
 & P_{\xi}(\xi, \eta) + P_{\eta}(\xi, \eta) - P_{\xi}(P_{\eta}(\xi, \eta)) = \\
 & = (1 - \xi)\mathbf{r}(0, \eta) + \xi\mathbf{r}(1, \eta) + (1 - \eta)\mathbf{r}(\xi, 0) + \eta\mathbf{r}(\xi, 1) \\
 & - (1 - \xi)(1 - \eta)\mathbf{r}(0, 0) - (1 - \xi)\eta\mathbf{r}(0, 1) - \xi(1 - \eta)\mathbf{r}(1, 0) - \xi\eta\mathbf{r}(1, 1)
 \end{aligned}$$

$$P_{\xi} \oplus P_{\eta} = P_{\xi} + P_{\eta} - P_{\xi}P_{\eta}$$

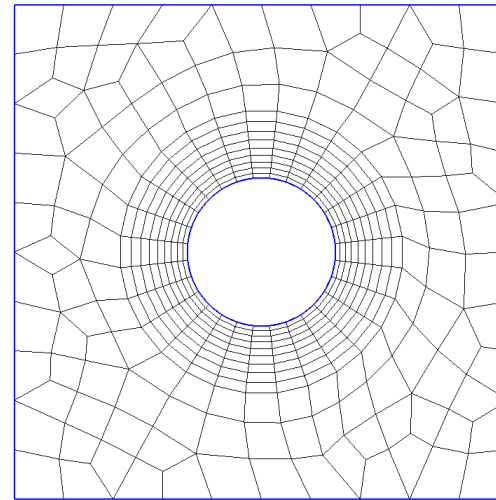
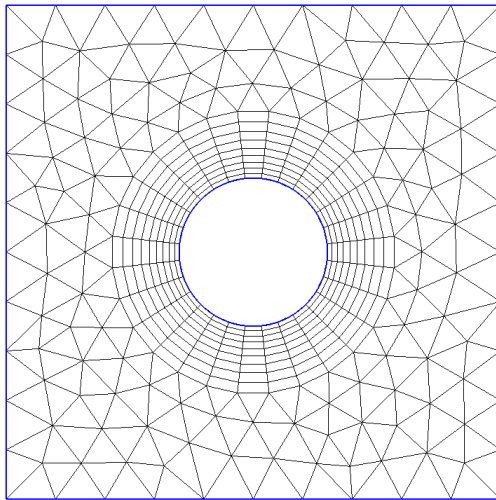
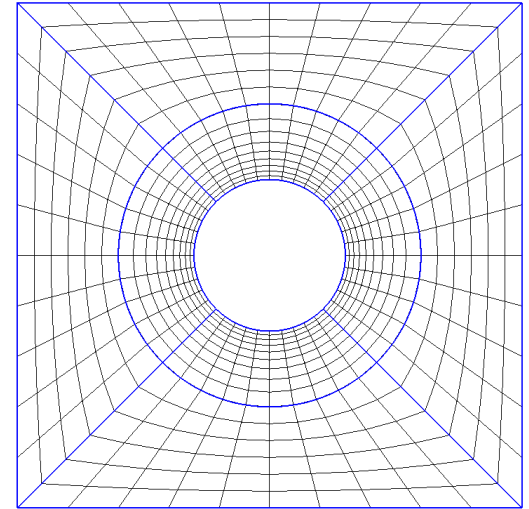
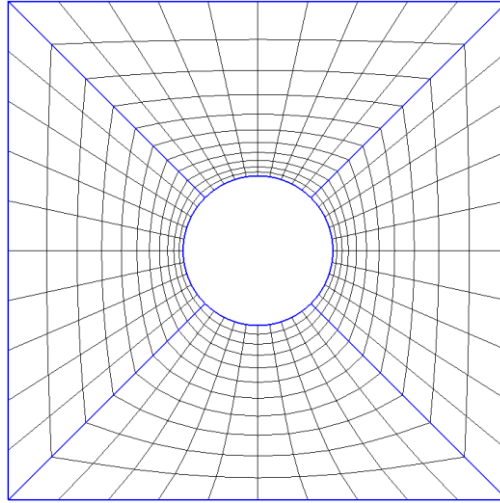
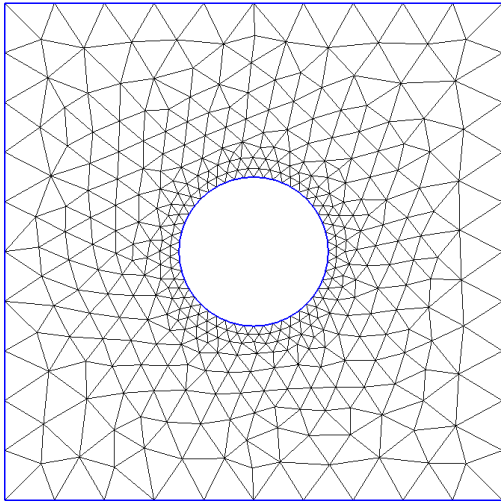
$$P_{\xi}(\xi, \eta) = (1 - \xi)\mathbf{r}(0, \eta) + \xi\mathbf{r}(1, \eta),$$

$$P_{\eta}(\xi, \eta) = (1 - \eta)\mathbf{r}(\xi, 0) + \eta\mathbf{r}(\xi, 1)$$

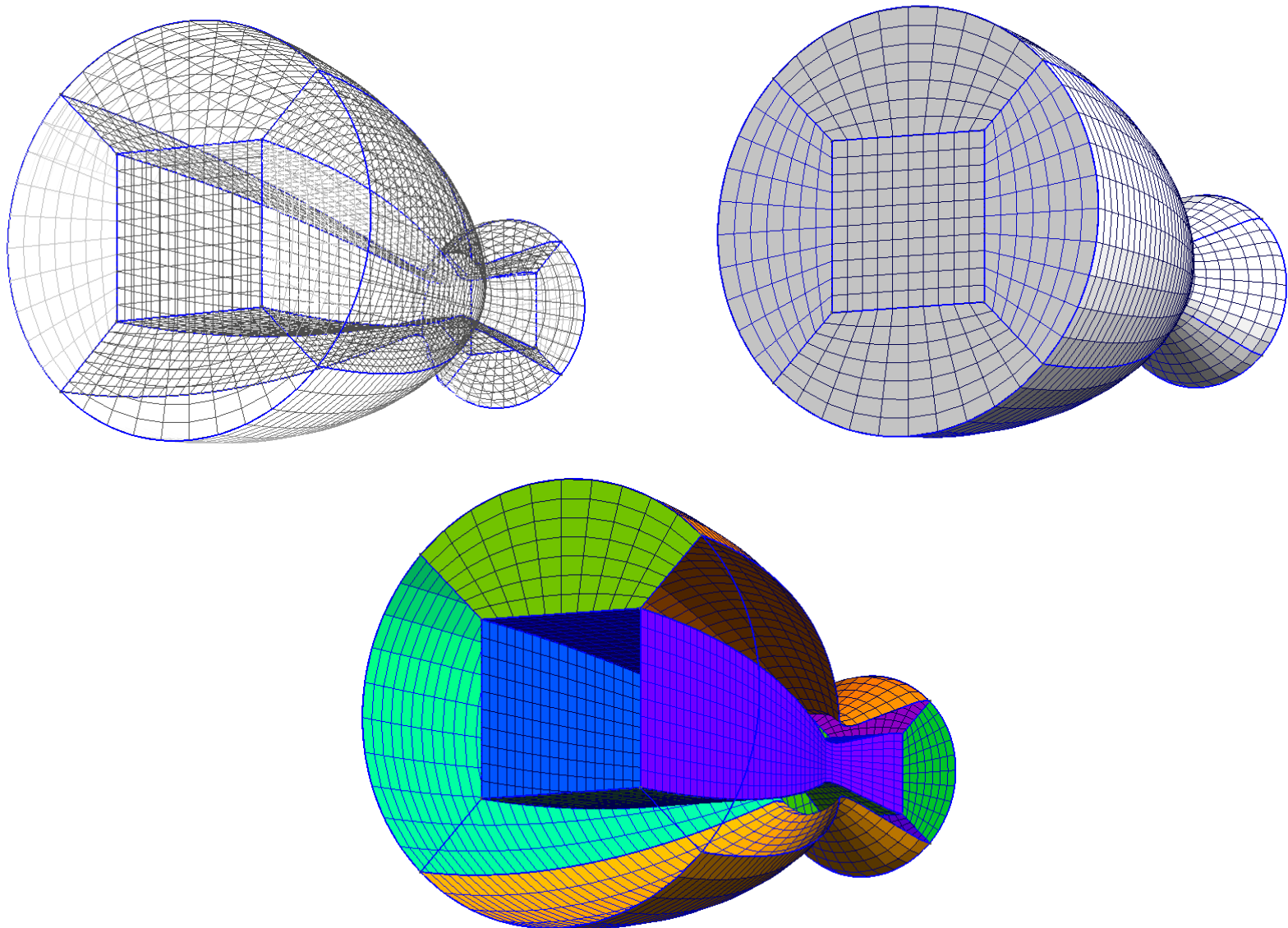


Трансфинитная интерполяция : 3D - аналогично

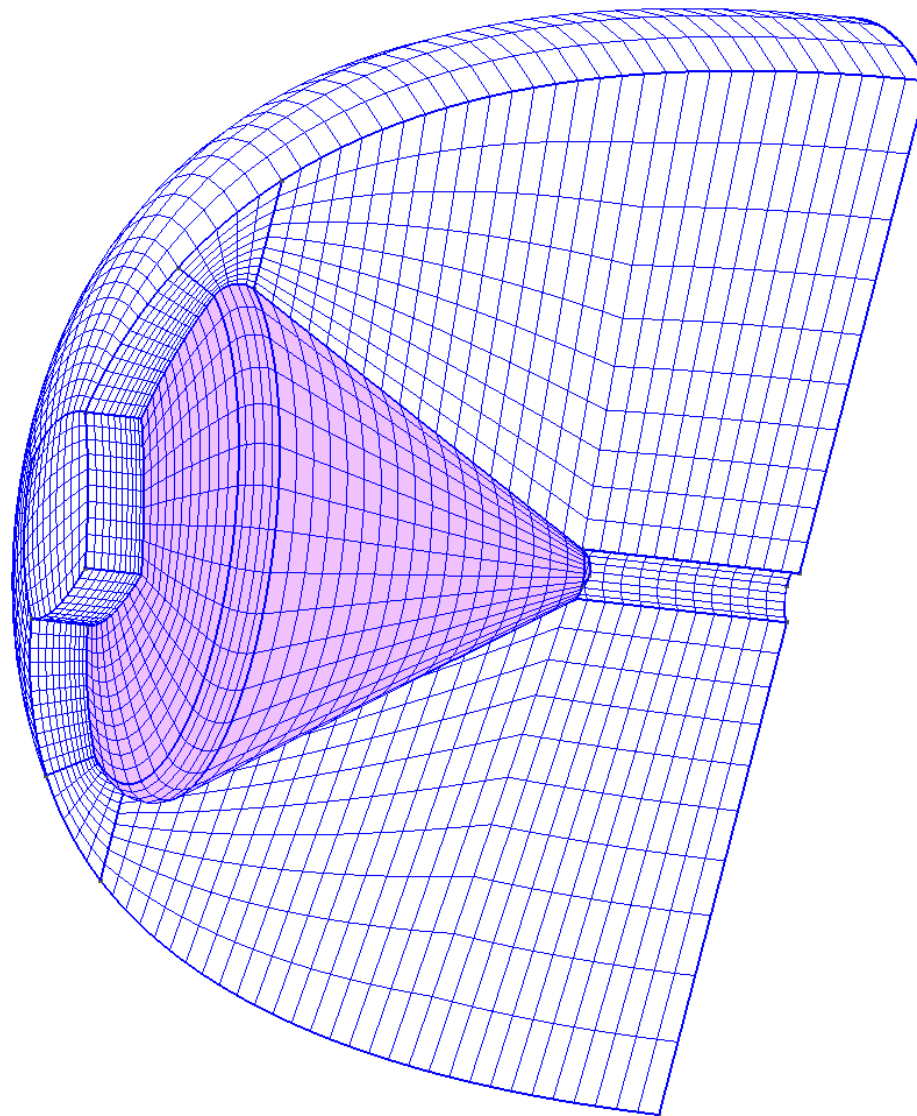
Сетки для обтекания цилиндра



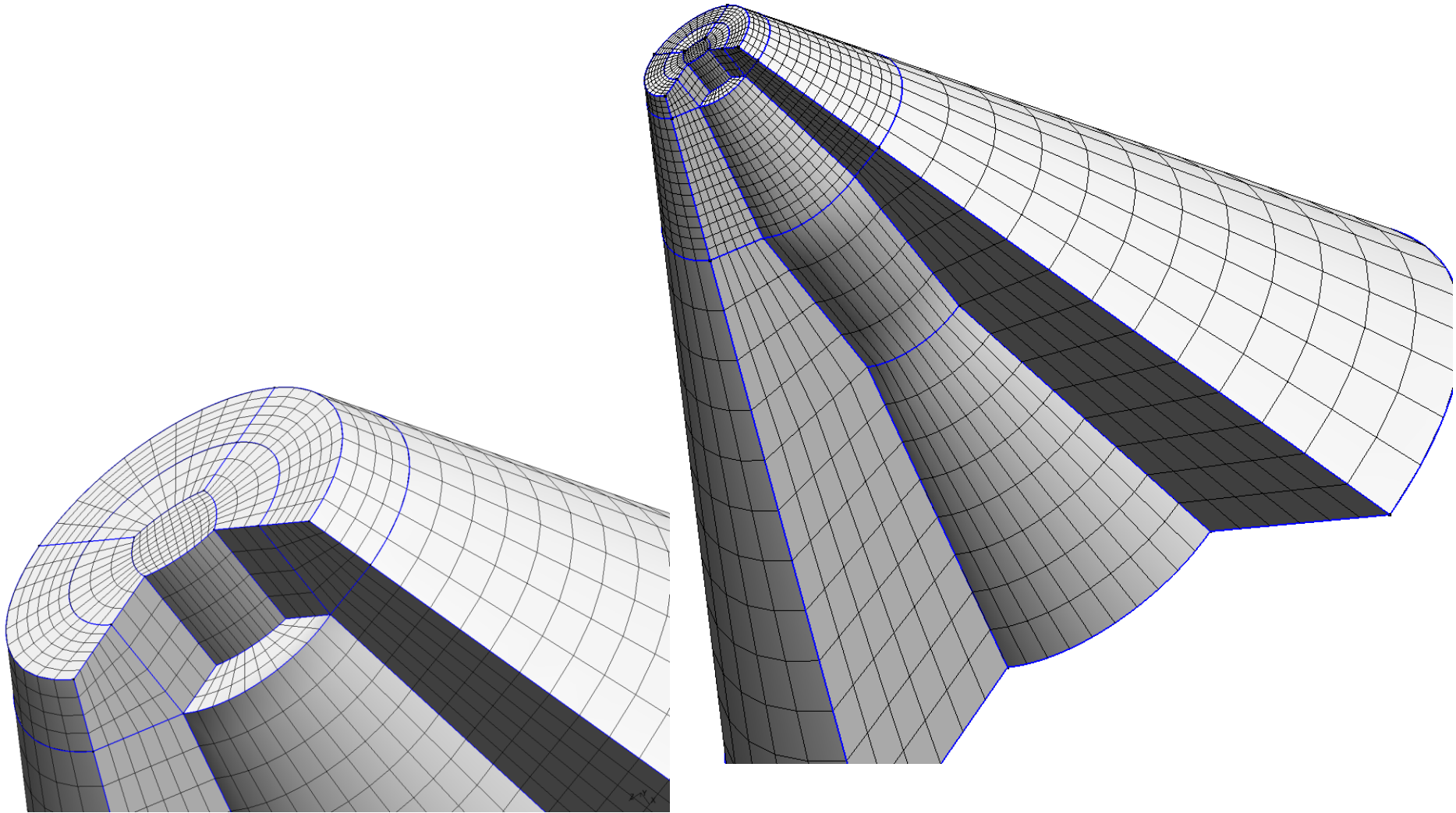
Трехмерная трансфинитная сетка для сопла



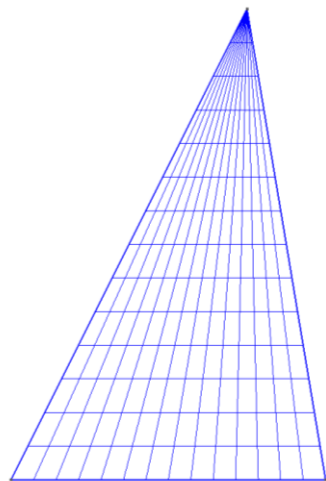
Трехмерная трансфинитная сетка КА Apollo



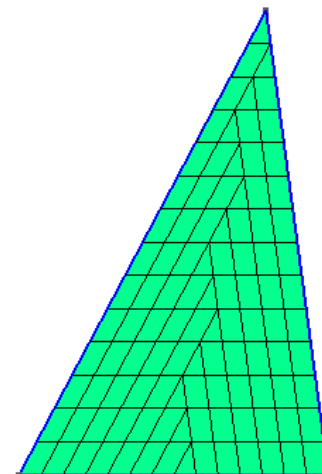
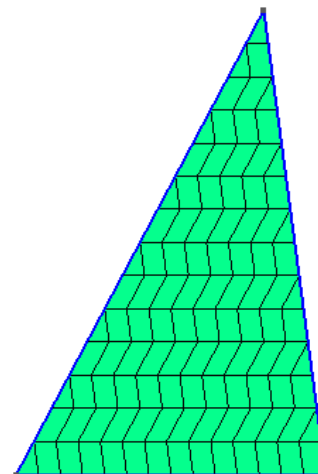
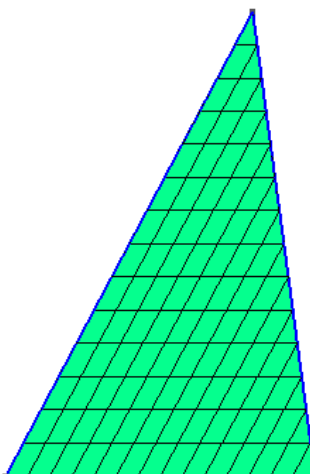
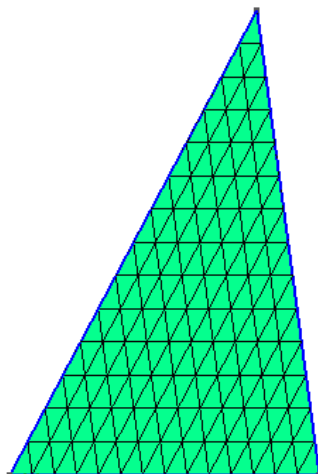
Трехмерная трансфинитная сетка : пример



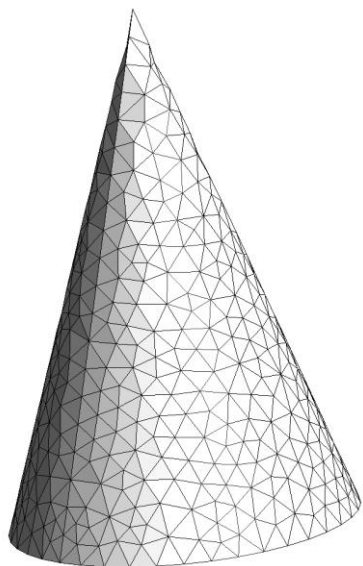
Треугольные трансфинитные сетки



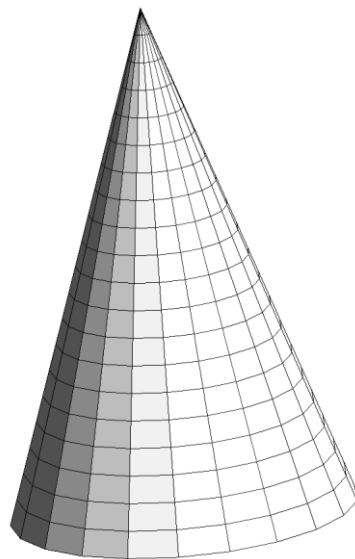
стандарт



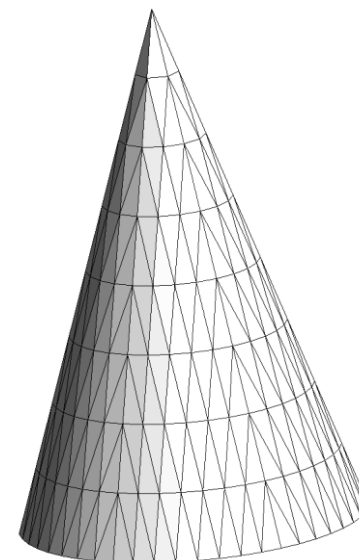
треугольные элементы



Обычная сетка

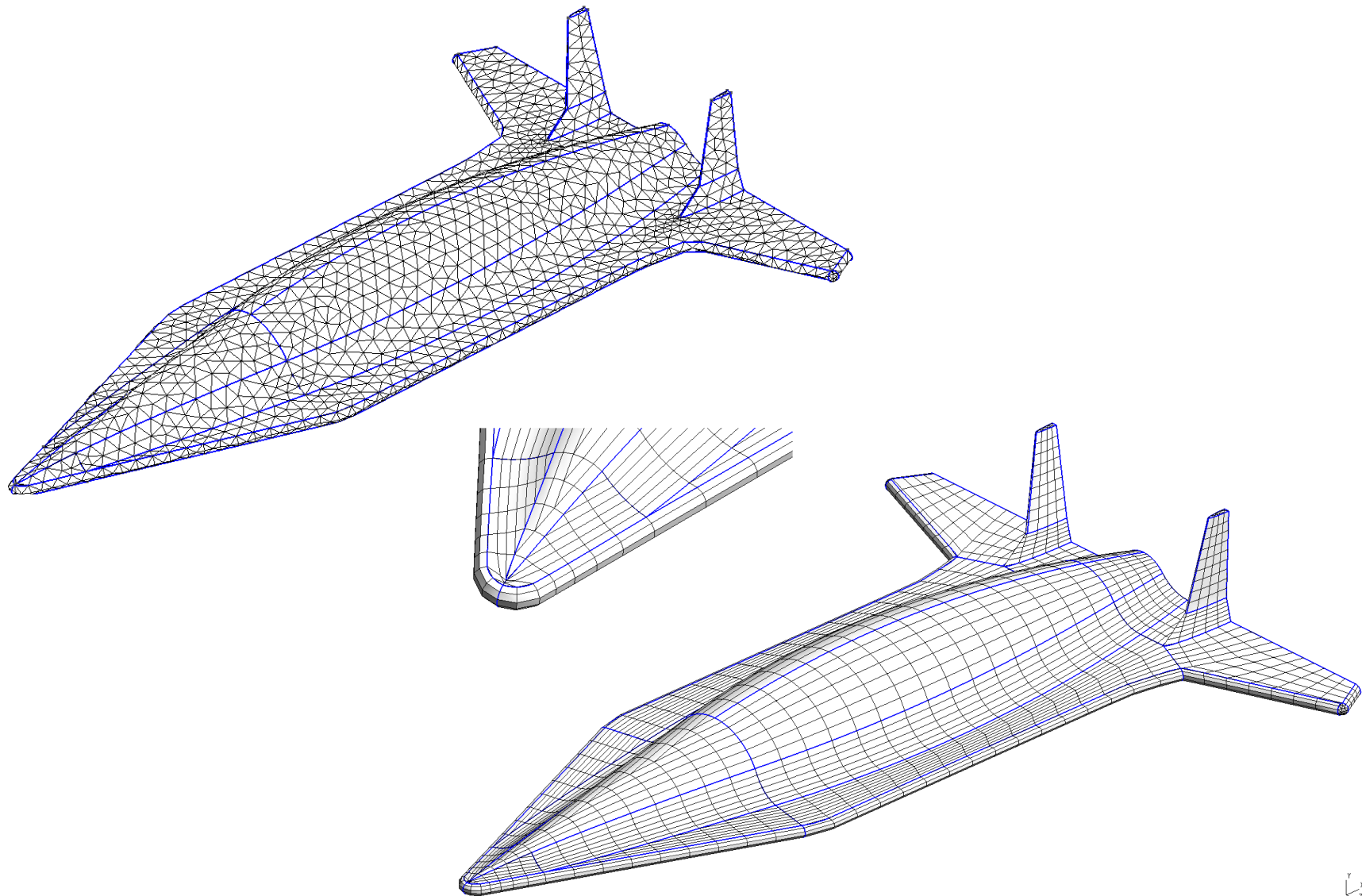


Трансфинитная сетка

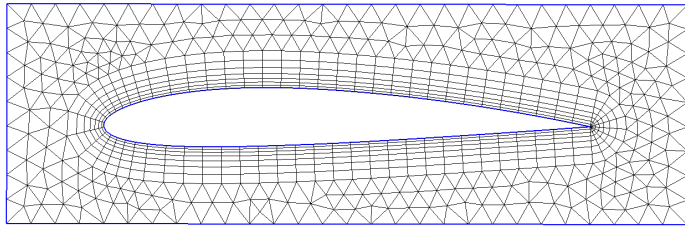


Треугольная трансфинитная сетка

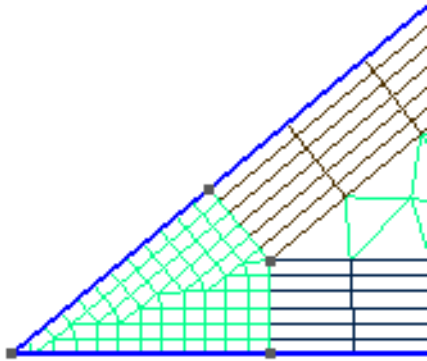
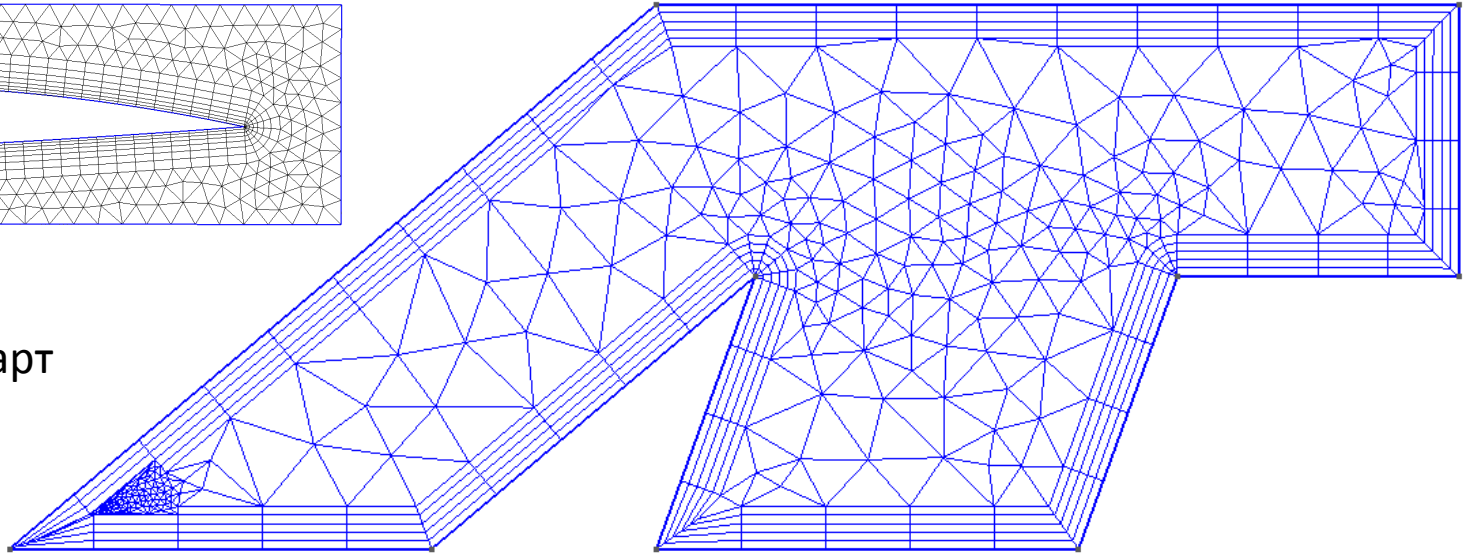
Перспективный летательный аппарат Boeing



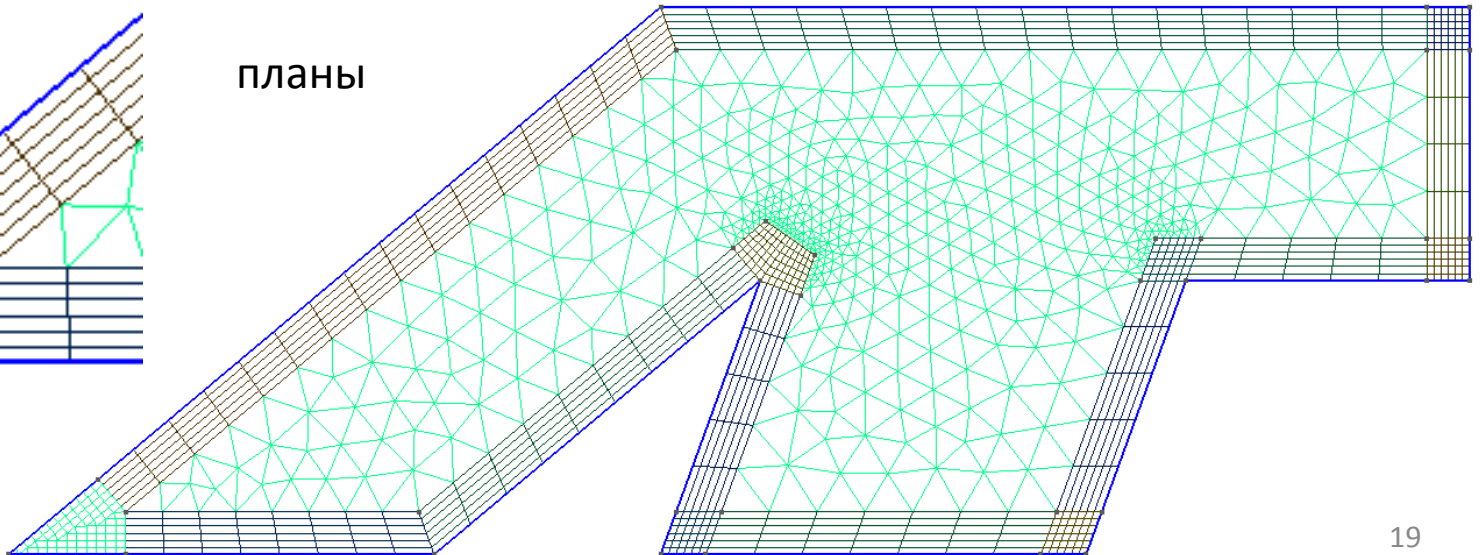
Двумерный пограничный слой



стандарт



планы



Дополнения в Gmsh

- Fortran API (генерация header'ов и примеры) (C, C++, Python, Julia)
- Треугольные трансфинитные сетки (WIP – work in progress)
- Вывод сетки в нейтральном формате NEU : пирамиды, призмы, гексаэдры (тетраэдры)
- Генерация пограничного слоя - планы

Ермаков М. К., Крючкова А. С. Генерация неструктурированных тетраэдральных сеток для обтекания летательных аппаратов на основе открытых пакетов. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2020. Т.21, вып. 2.

Ермаков М.К. Генерация пространственных тетраэдральных сеток для суперкомпьютерного моделирования обтекания аэрокосмических объектов. *CAD/CAM/CAE Observer #2 (142)*, 2021.

Спасибо за внимание