



Двенадцатый профессиональный слёт
разработчиков отечественных CFD кодов
«Отечественные CFD коды – 2025»
(CFD Weekend-2025)



Gmsh, GridPro: на пути к автоматической генерации гексаэдральных сеток

М.К. Ермаков

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

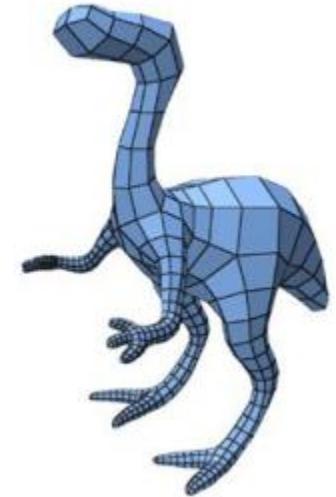
Москва, 29-30 ноября 2025 г.

Особенности современного софта

- Мгновенный перевод текста в браузере (one touch)
- Перевод речи видео
- Ответы AI на вопросы (Алиса, ...)
- Большое количество специализированных ресурсов (ixbt, StackOverflow, ...)
- Некоммерческий характер софта для исследований:
oneAPI C++/Fortran, Visual Studio, открытые пакеты
- Free Source : github, gitlab
- Free Source : финансирование (Blender, OpenCASCADE, Gmsh)
- Free Source : командная работа
обновление ядра Linux 5.14 (2021): 15883 исправления от 2002 разработчиков
изменено 12580 файлов, добавлено 861501 строк кода, удалено 321645 срок
- Продукты становятся все более сложными (природу не обманешь)
Intel Fortran (oneAPI) – 2000 страниц документации
OpenMP/MPI/Cuda
MKL – 4000 страниц
Кроссплатформенные средства
ANSYS – 1 млн человеко-лет

Open Source

- Linux – операционная система
 - GNU C++/Fortran - кроссплатформенные компиляторы
 - Python, Julia, ...
 - FreeCAD, Salome - CAD
 - OpenFOAM - Моделирование
 - OpenCASCADE – Геометрическое ядро
 - Gmsh – генератор сеток
 - Qt - кроссплатформенный фреймворк
 - системы сборки, пакетные менеджеры, кроссплатформенные средства
 - MUMPS – прямой метод решения линейных систем
 - METIS, Scotch – работа с графами
 - Blender 3D – трехмерная графика и анимация
-
- Значительное количество ошибок (Linux – не исключение)
 - Проблемы с документацией и примерами
 - Режим бета-тестирования (поиск, отладка, исправления, обходные пути)



Геометрические ядра/CAD системы

- ACIS, CGM – западные : Fusion, CATIA, Creo
- Parasolid – западное, коммерческое : SolidWorks, NX, Solid Edge, T-Flex
- C3D – дочерняя компания АСКОН, коммерческое : КОМПАС-3D, NanoCAD
- RGK – Топ Системы/Росатом
- OpenCASCADE – Open source : FreeCAD

Сложность

- Parasolid : 350 человеко-лет, 800 функций

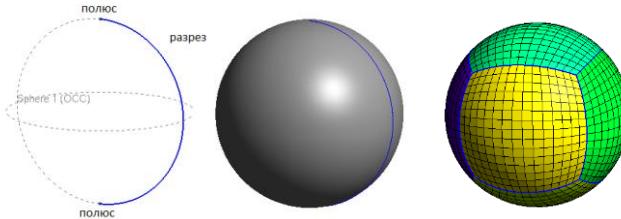
Иерархия систем

- Полнофункциональная CAD : SolidWorks, ...
- Open Source CAD : FreeCAD
- Toolbox : Analysis Situs – открытая функциональная надстройка над ГЯ
- OpenCASCADE – открытое ГЯ

Источники проблем CAD

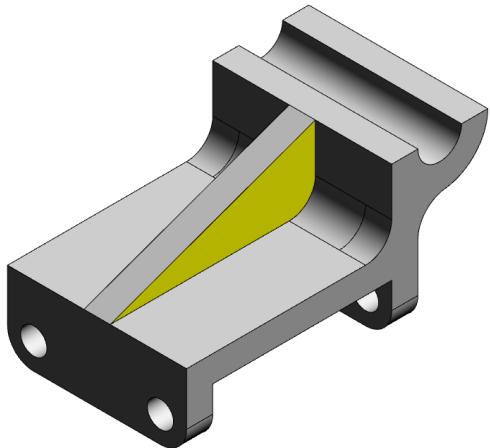
- Двухмерность представления поверхностей : разрезы, вырожденные точки

$$x^2+y^2+z^2=1$$



- Избыточность данных : геометрия (рисование) + топология (операции)
кривая : начальная вершина (координаты), конечная вершина (координаты)
- Двойственность представления : каноническая форма – сплайны
необходимость перехода от канонической формы к сплайнам при преобразованиях, изменяющих длину
- Ошибки геометрии
нарушение водонепроницаемости
лишнее разбиение ребер
раздельное создание смежных элементов
«висячие» элементы, в том числе, из-за ошибок булевых операций
- Несовместимость представлений (форматов) различных CAD

Исходные геометрии, типы сеток

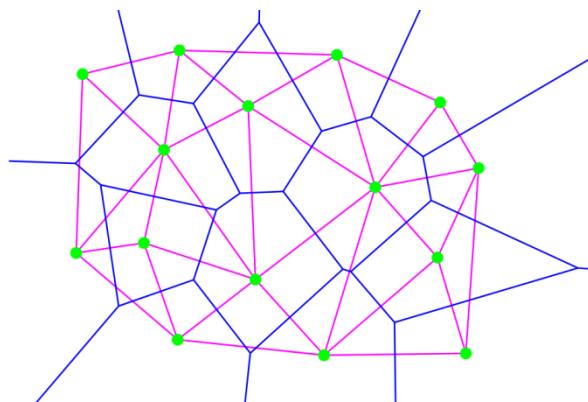


BRep данные (STEP)

«Какую сетку построишь –
такое решение и получишь»

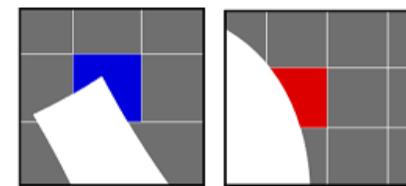


STL (OBJ) данные
remeshing



Триангуляция Делоне
+ рекомбинация в quad

Диаграмма Вороного

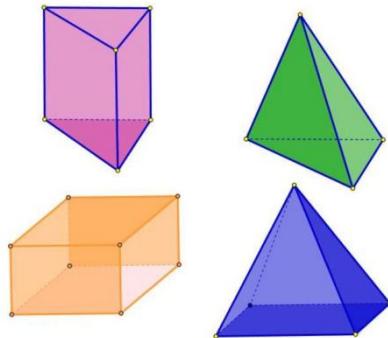


Отсеченные квадраты
FlowVision, OpenFoam

Типы сеток несовместимы

Типы сетки

- тетраэдр
- призма
- пирамида
- гексаэдр



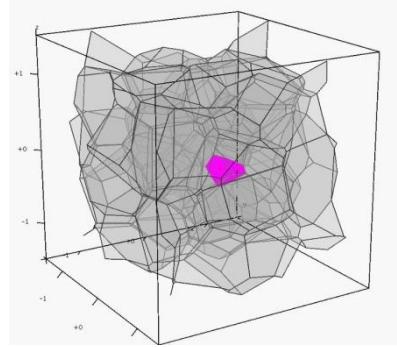
Объем:

- 1+ млн - оперативные и тестовые расчеты
- 10+ млн - массовые расчеты
- 100+ млн – индустриальные приложения

Подготовка геометрии и сеток:

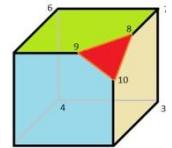
- индустриальные приложения – 1+ месяц

объемные элементы Вороного



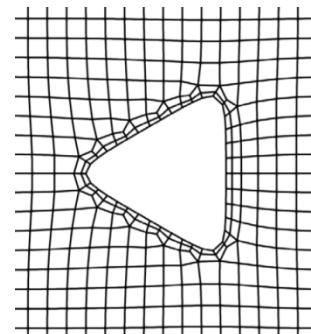
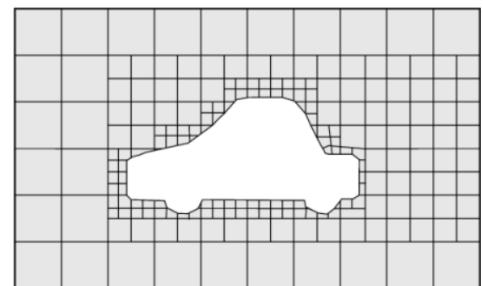
основаны на тетраэдрах

отсеченные кубы

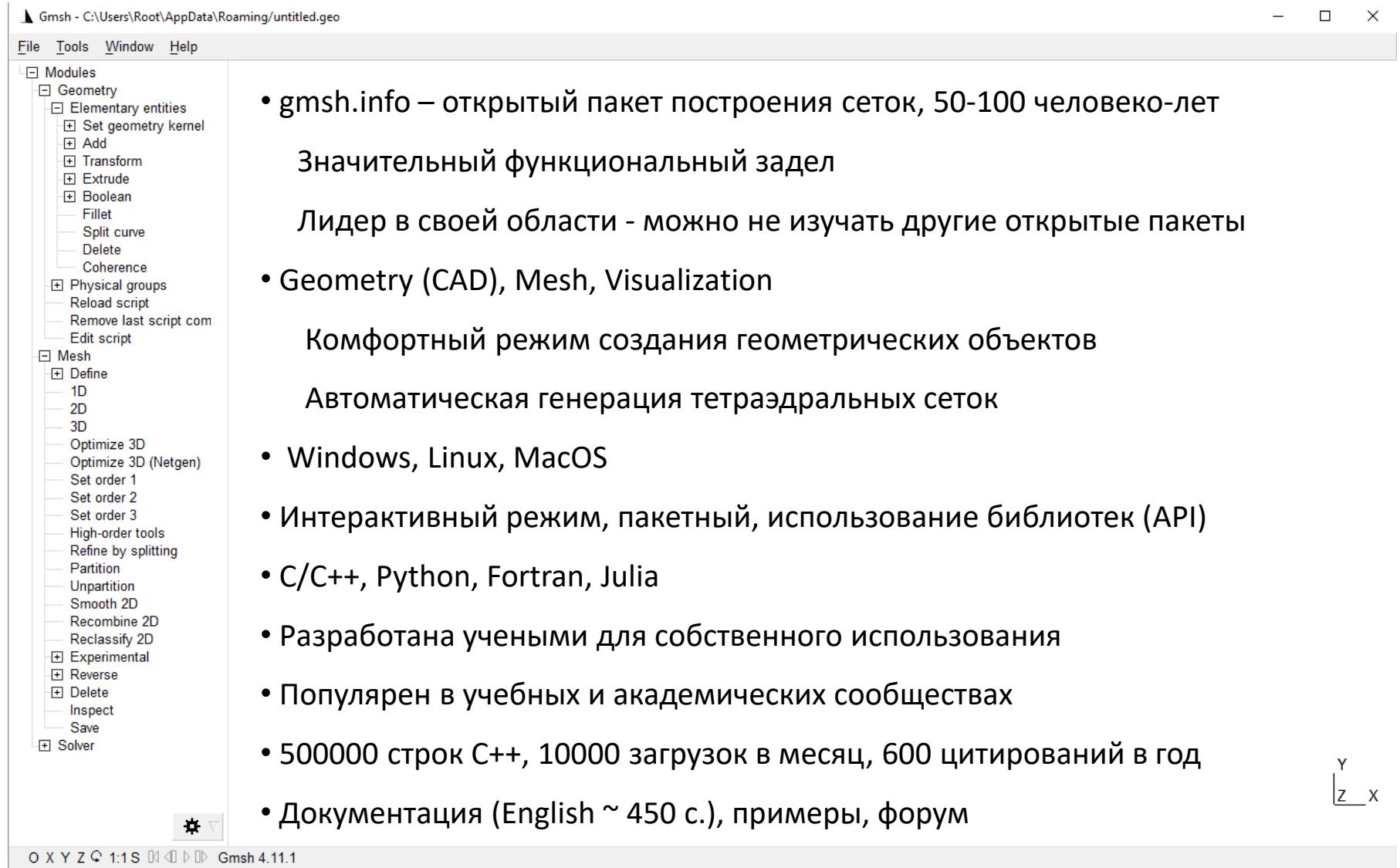


OpenFOAM:

- blockMesh
- snappyHexMesh
- cfMesh



Общая информация о Gmsh 4.15.0



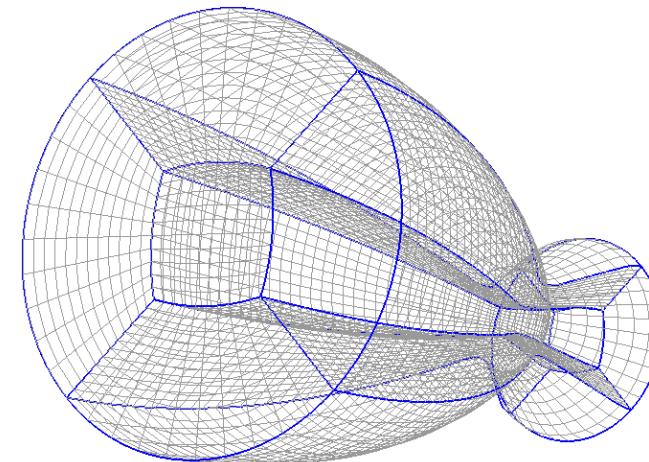
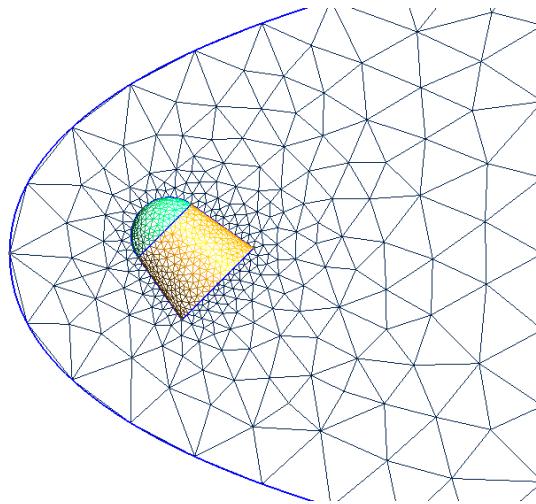
The screenshot shows the Gmsh 4.15.0 application window. The menu bar includes File, Tools, Window, and Help. The left sidebar contains a tree view of geometry entities under Modules, including Geometry, Elementary entities (with sub-options like Set geometry kernel, Add, Transform, Extrude, Boolean, Fillet, Split curve, Delete, Coherence), Physical groups (with sub-options like Reload script, Remove last script com, Edit script), and Mesh (with sub-options like Define, 1D, 2D, 3D, Optimize 3D, Optimize 3D (Netgen), Set order 1, Set order 2, Set order 3, High-order tools, Refine by splitting, Partition, Unpartition, Smooth 2D, Recombine 2D, Reclassify 2D, Experimental, Reverse, Delete, Inspect, Save, and Solver). The status bar at the bottom shows O X Y Z Q 1:1 S and Gmsh 4.11.1.

- gmsh.info – открытый пакет построения сеток, 50-100 человеко-лет
 - Значительный функциональный задел
 - Лидер в своей области - можно не изучать другие открытые пакеты
- Geometry (CAD), Mesh, Visualization
 - Комфортный режим создания геометрических объектов
 - Автоматическая генерация тетраэдralьных сеток
- Windows, Linux, MacOS
- Интерактивный режим, пакетный, использование библиотек (API)
- C/C++, Python, Fortran, Julia
- Разработана учеными для собственного использования
- Популярен в учебных и академических сообществах
- 500000 строк C++, 10000 загрузок в месяц, 600 цитирований в год
- Документация (English ~ 450 с.), примеры, форум

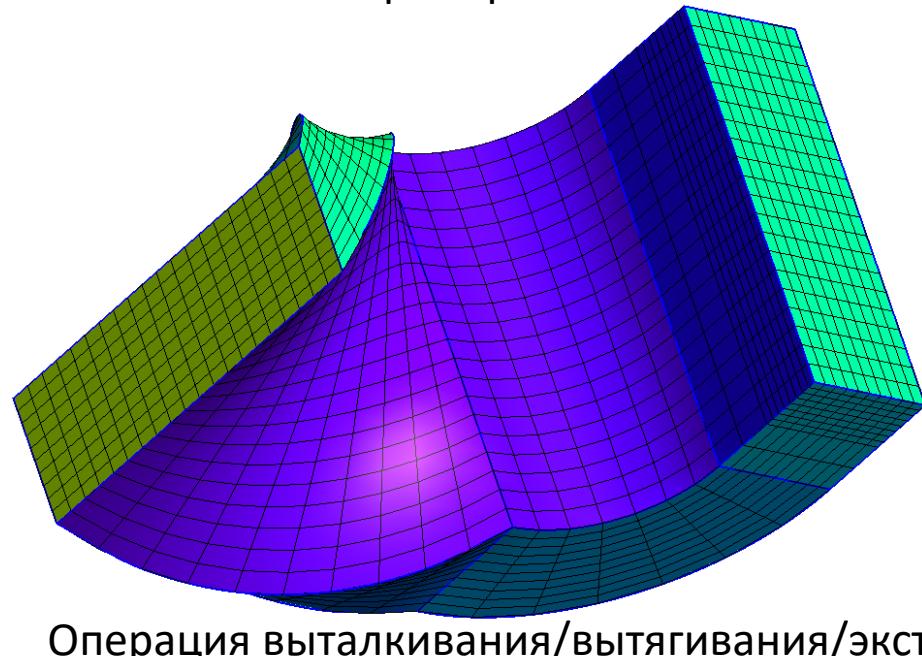
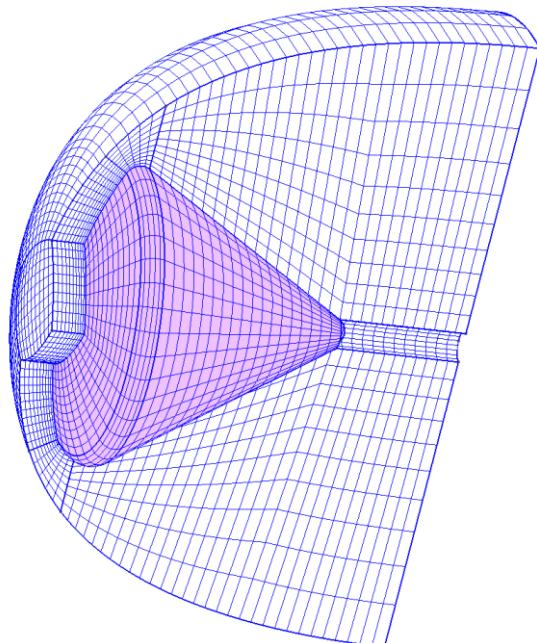
Вклад в разработку

- расширенные трансфинитные сетки с гибридными элементами
- интерфейсные элементы 2D пограничного слоя (на стыках ребер)
- IO в нейтральном формате Gambit (кроме тетраэдров)
- Интерфейс с Фортраном
- активная эксплуатация и тестирование

Автоматические тетраэдральные и трансфинитные сетки



Назначение трансфинитной области



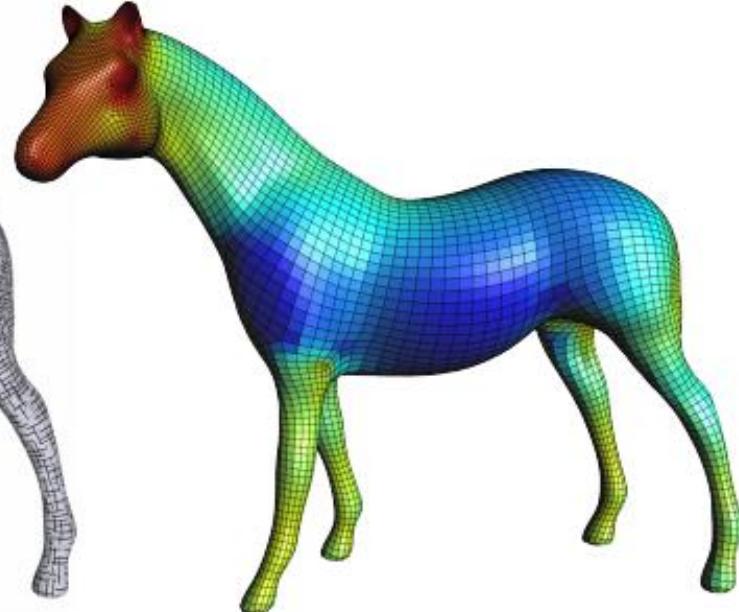
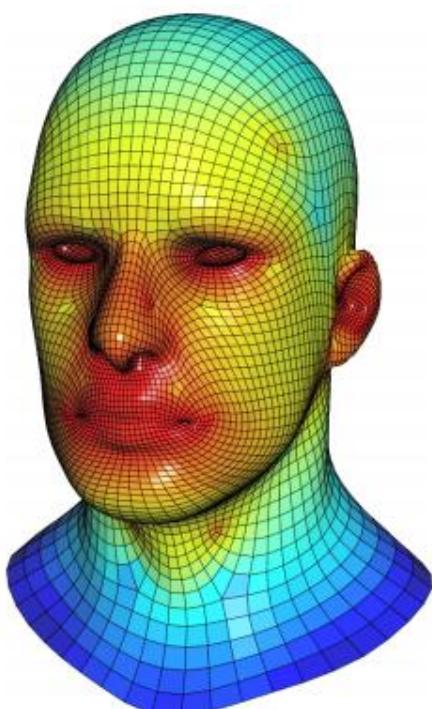
Операция выталкивания/вытягивания/экструзии

Quad сетки Gmsh



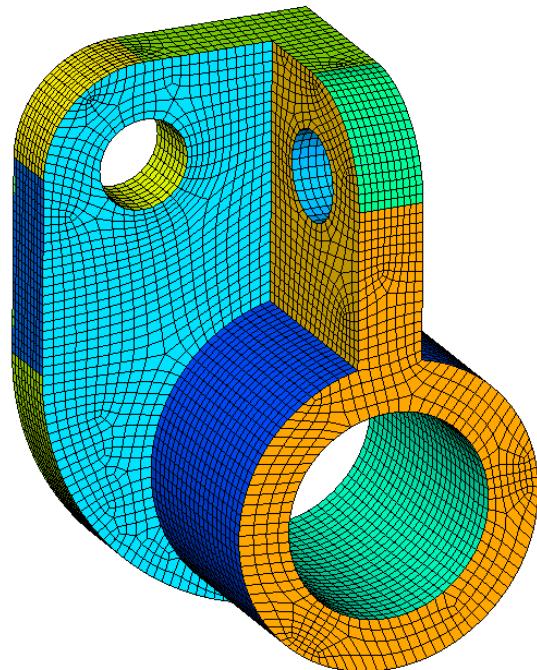
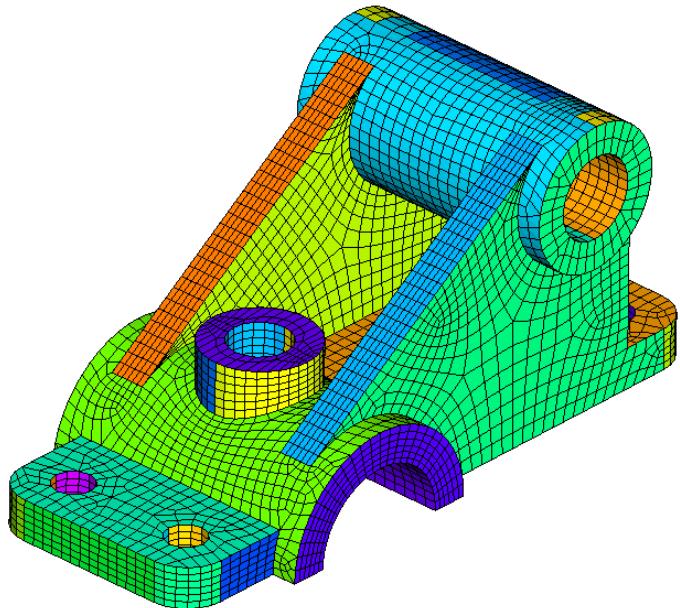
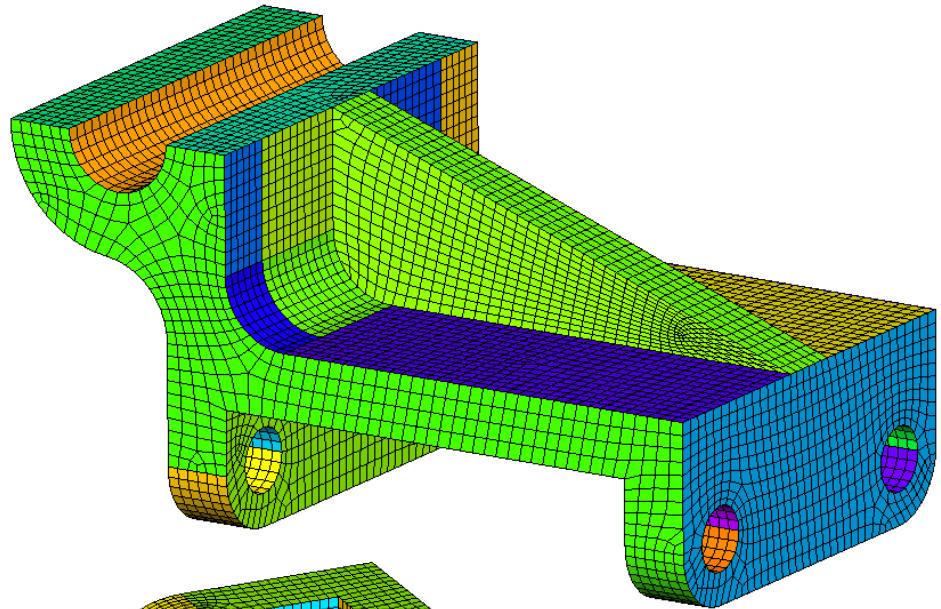
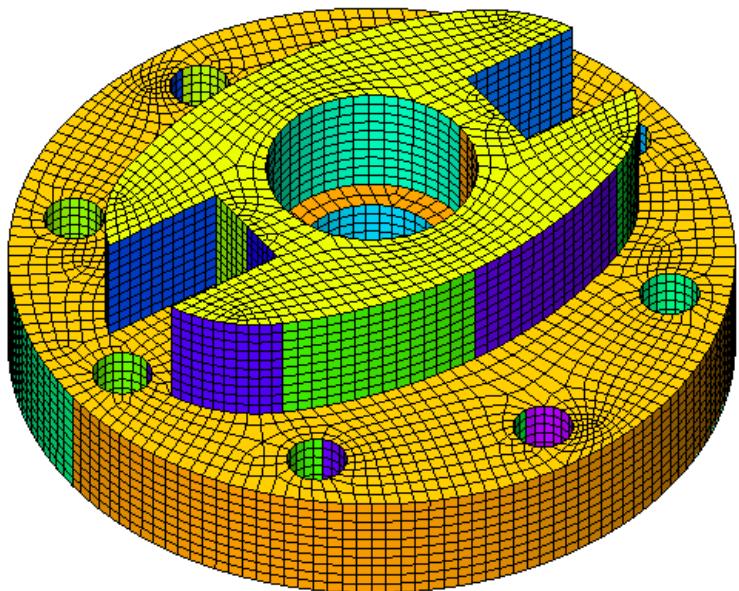
Поверхностные сетки, основанные на четырехугольниках:

- Recombine – объединение треугольников в четырехугольники
- Фронтальный метод Делоне для четырехугольников (8)
- Упаковка параллелограммами (9)
- Quasi-structured Quad (11) : основан на Rotational Symmetry field remeshing – минимизация функционала для полей направлений

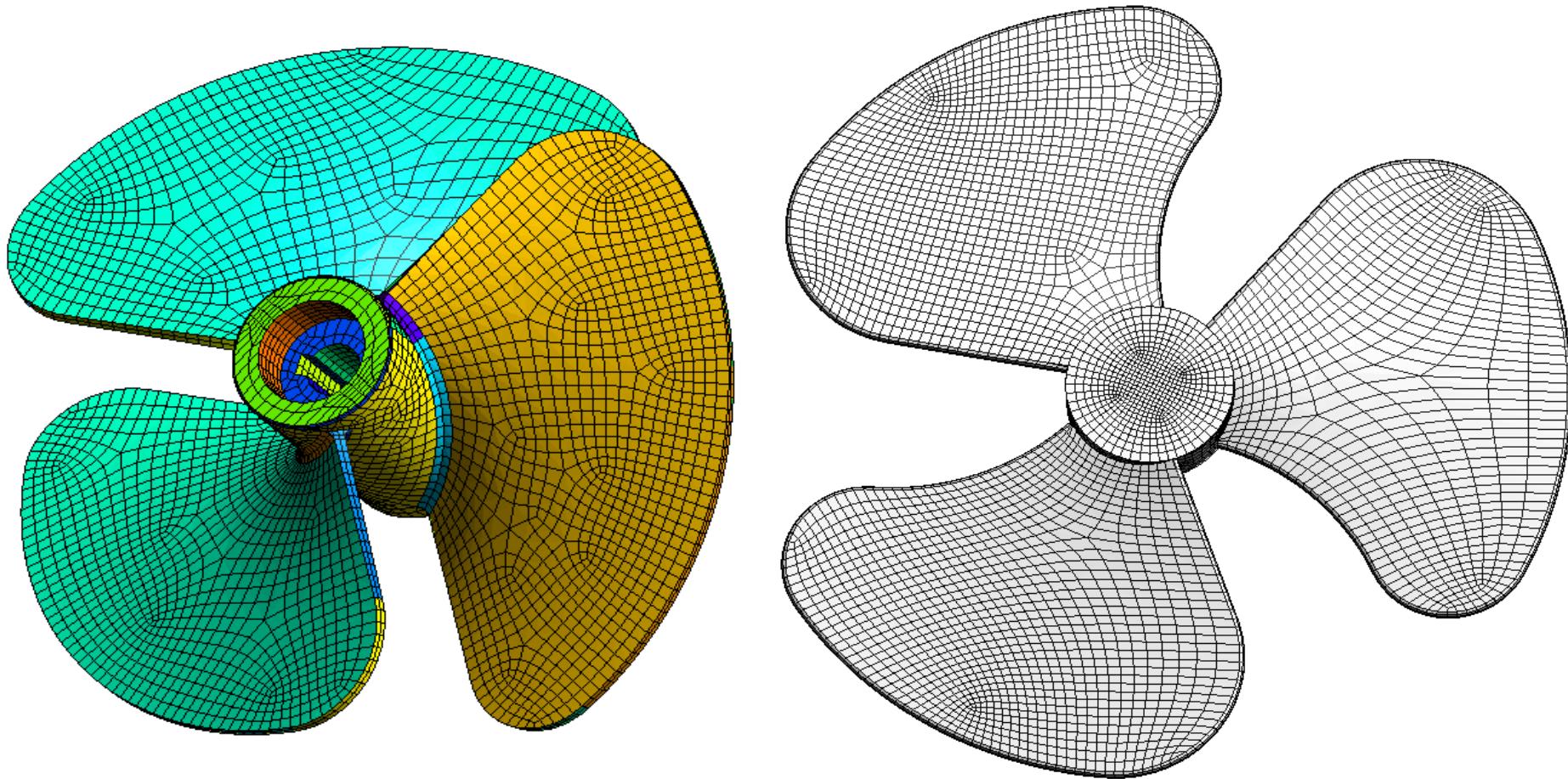


Имеется аналогичный плагин для Blender 3D

Машиностроение

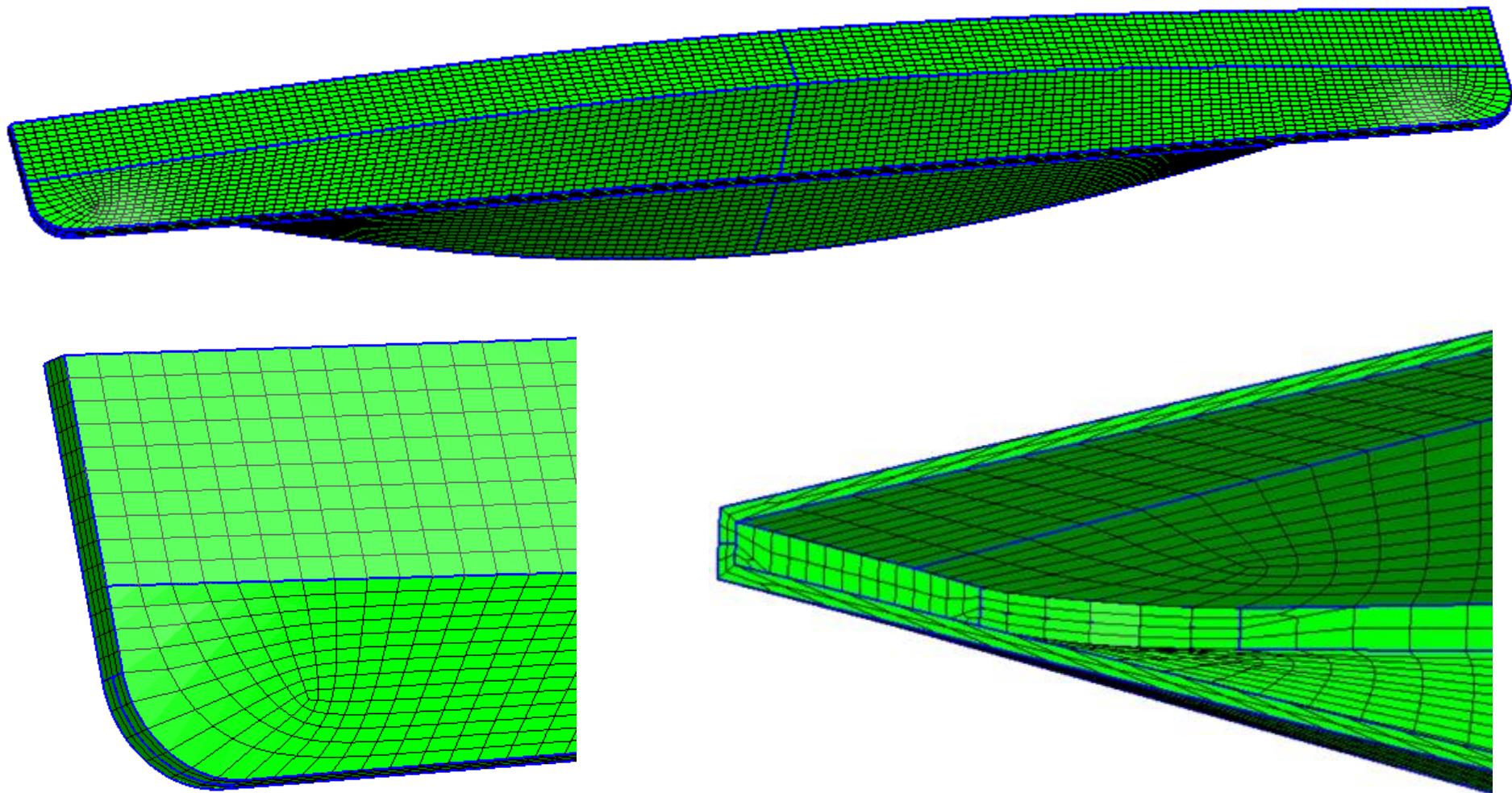


Гребной винт - вентилятор

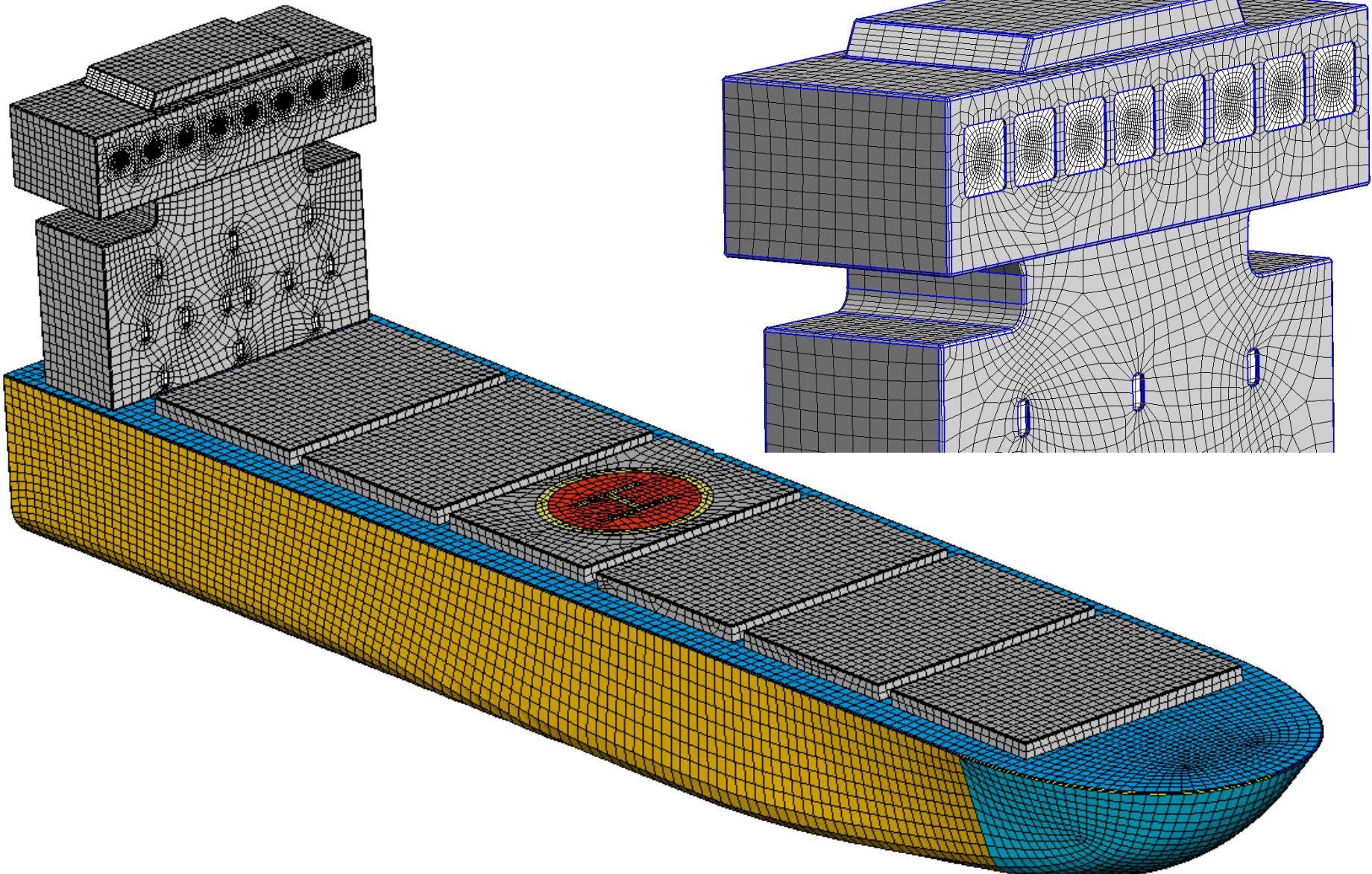


Разная сетка на всех трех (одинаковых) плоскостях

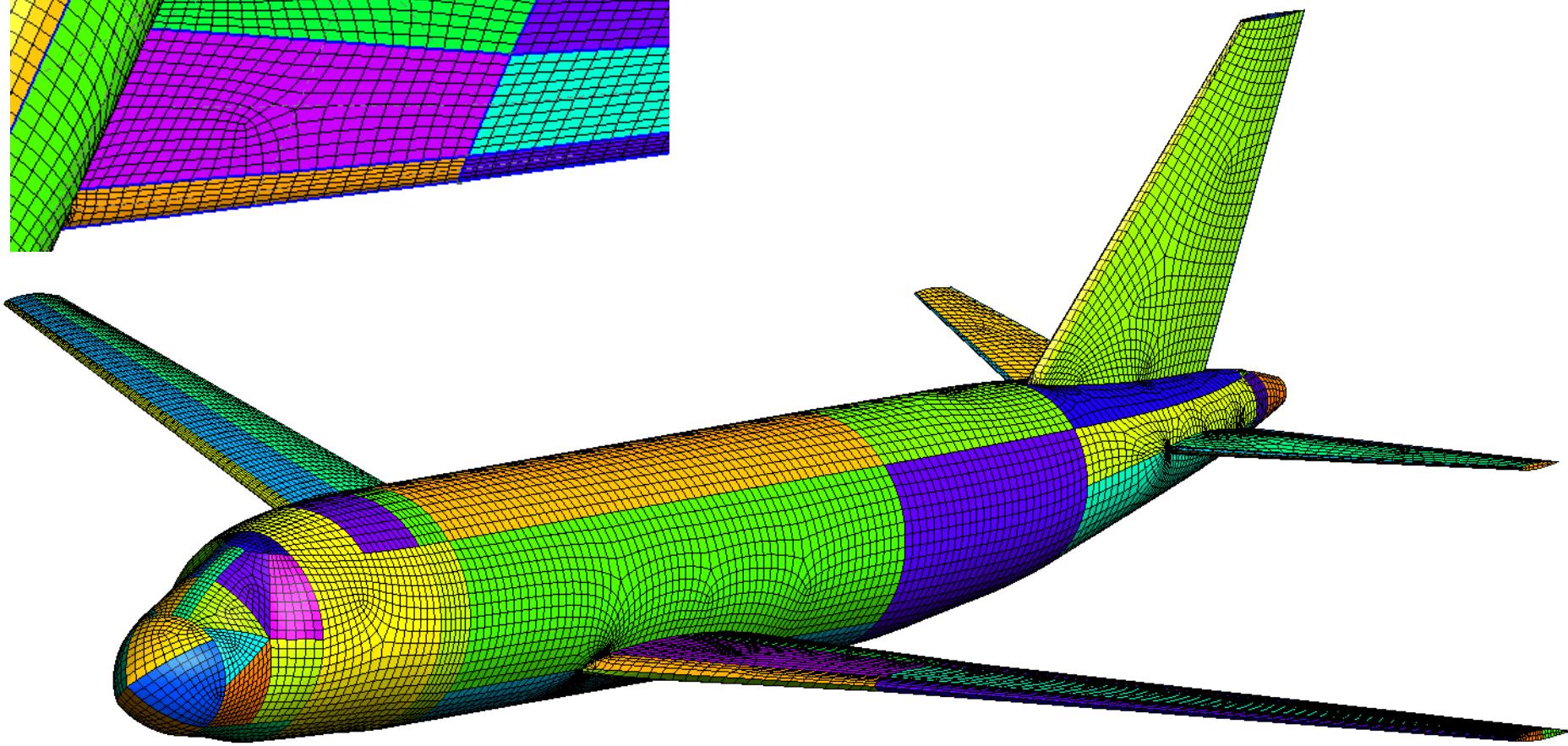
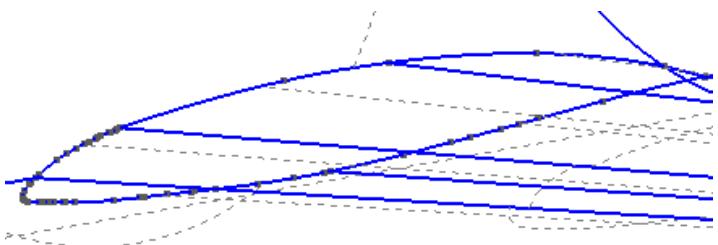
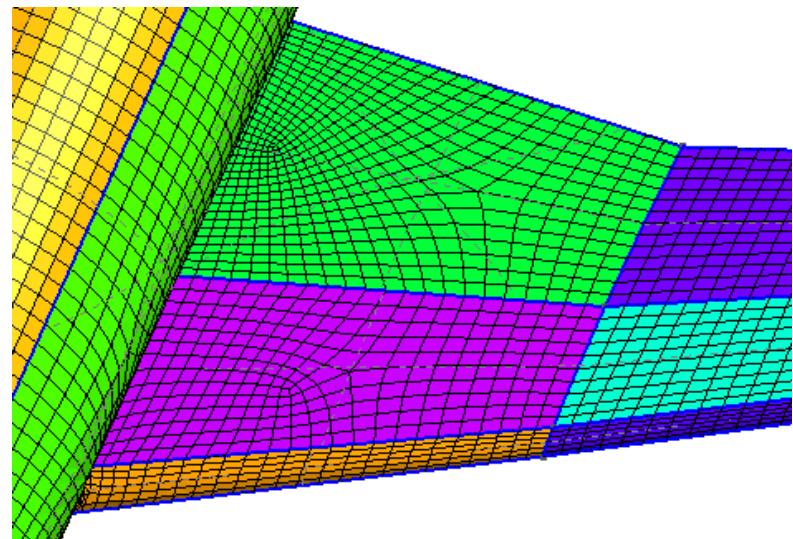
Canoe



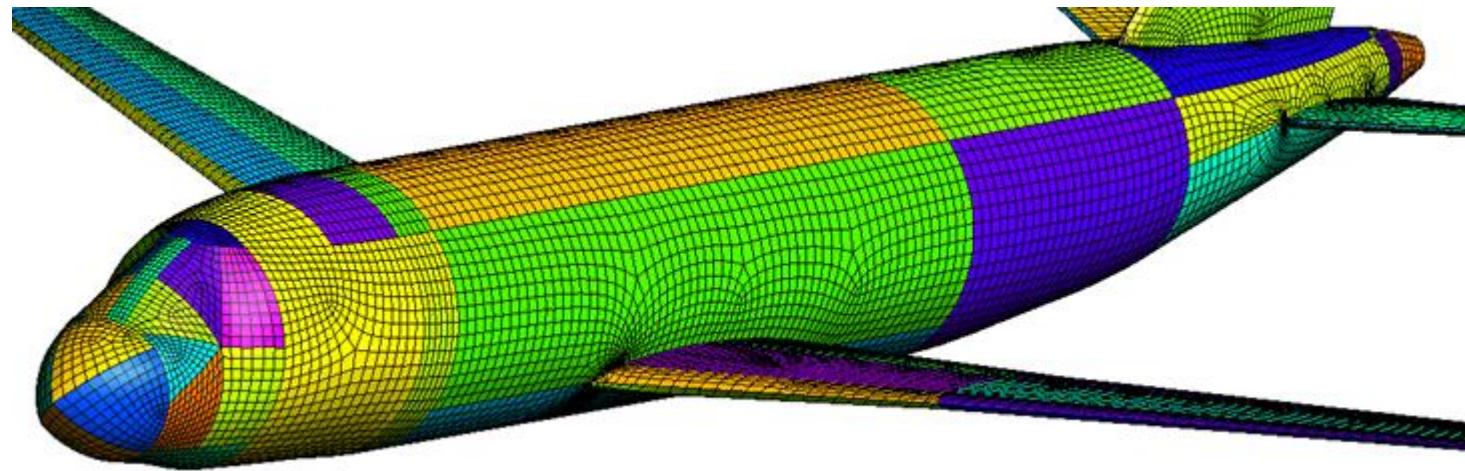
Судостроение



Airbus A319



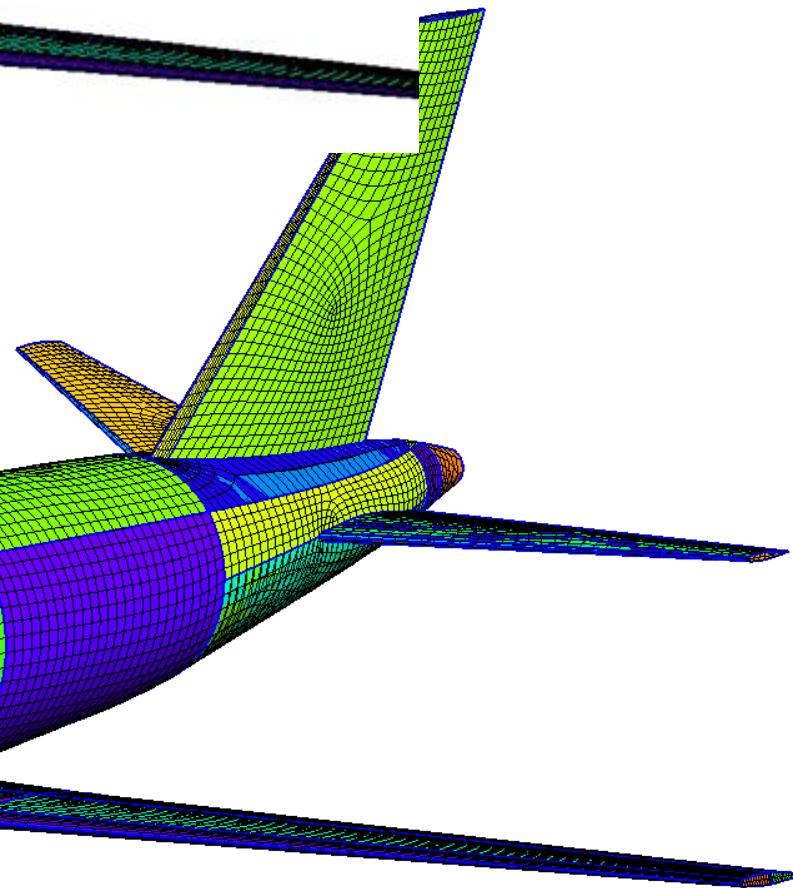
Airbus A-319 (Heal shape)



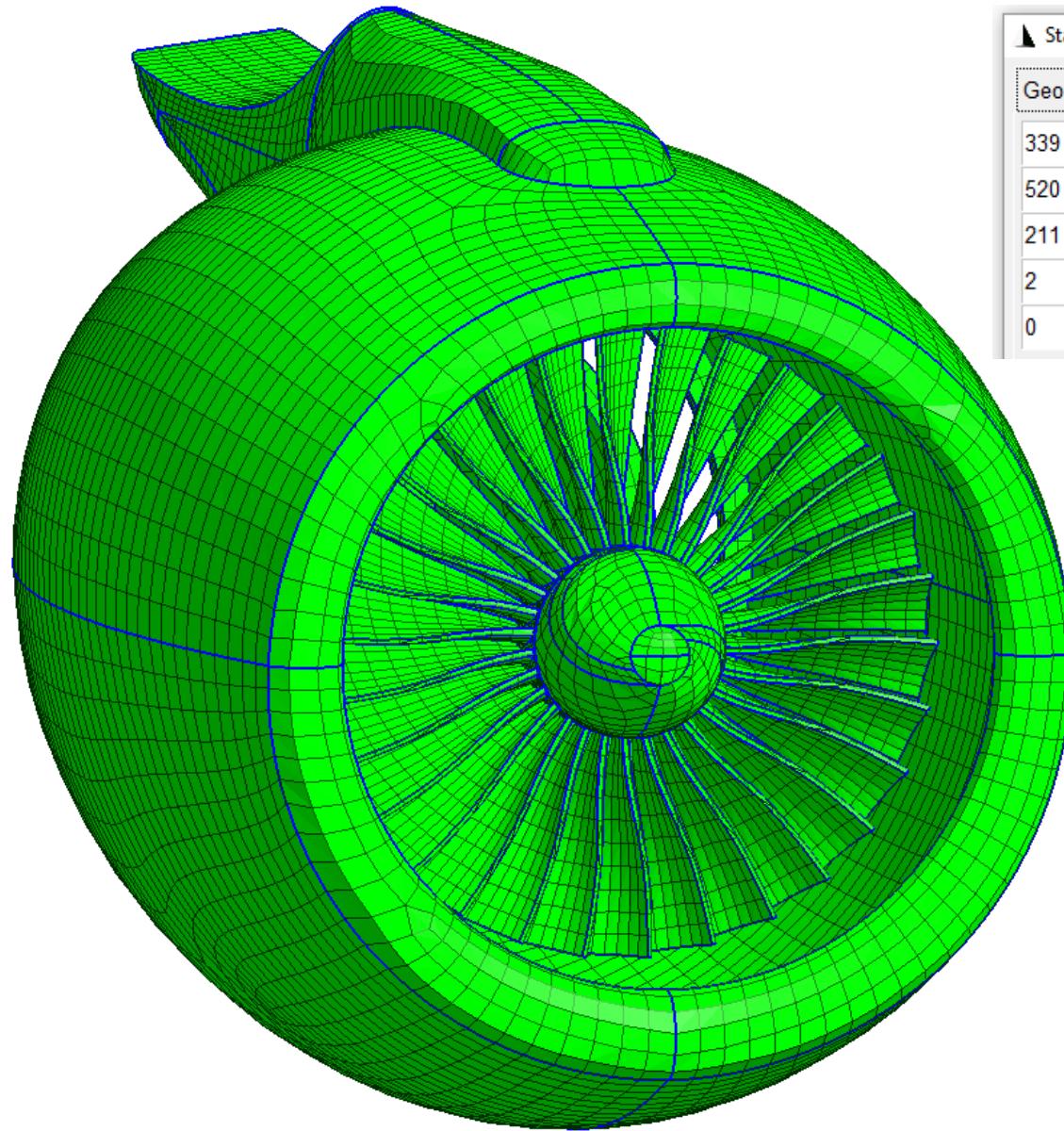
before



after heal-small-edges



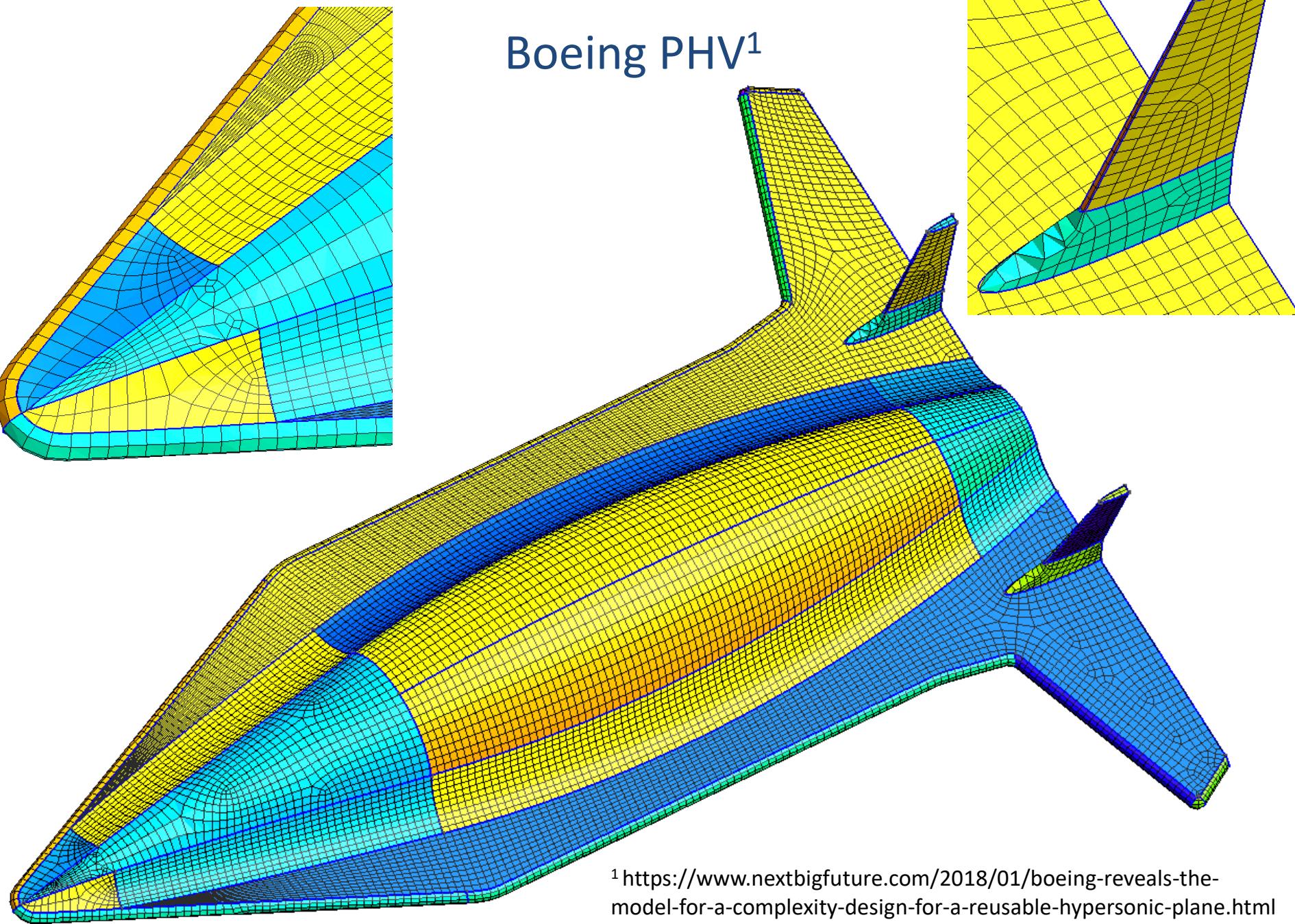
Airbus A-319 (Engine)



Statistics	
	Geometry
339	Points
520	Curves
211	Surfaces
2	Volumes
0	Physical groups

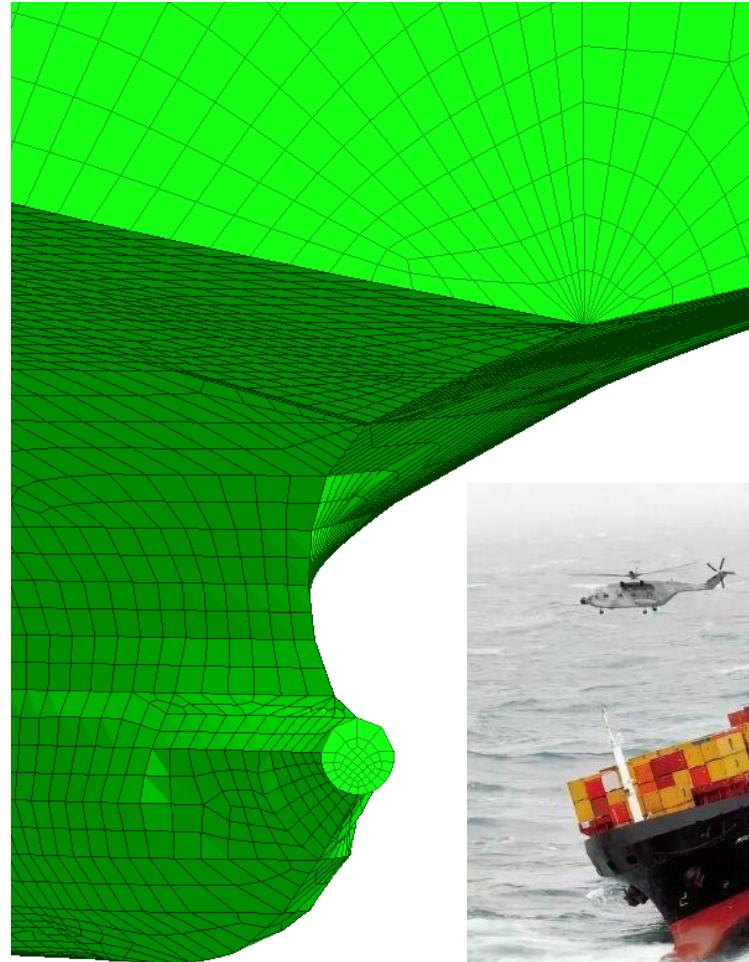
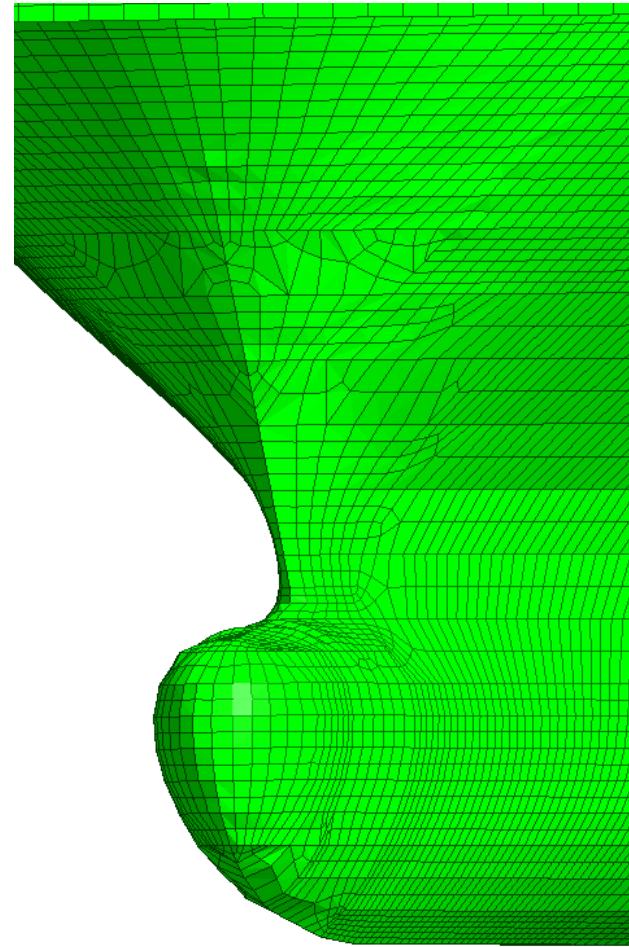
0	Triangles
16689	Quadrangles
1.23343	Time for 1D mesh
8.83486	Time for 2D mesh

Boeing PHV¹



¹ <https://www.nextbigfuture.com/2018/01/boeing-reveals-the-model-for-a-complexity-design-for-a-reusable-hypersonic-plane.html>

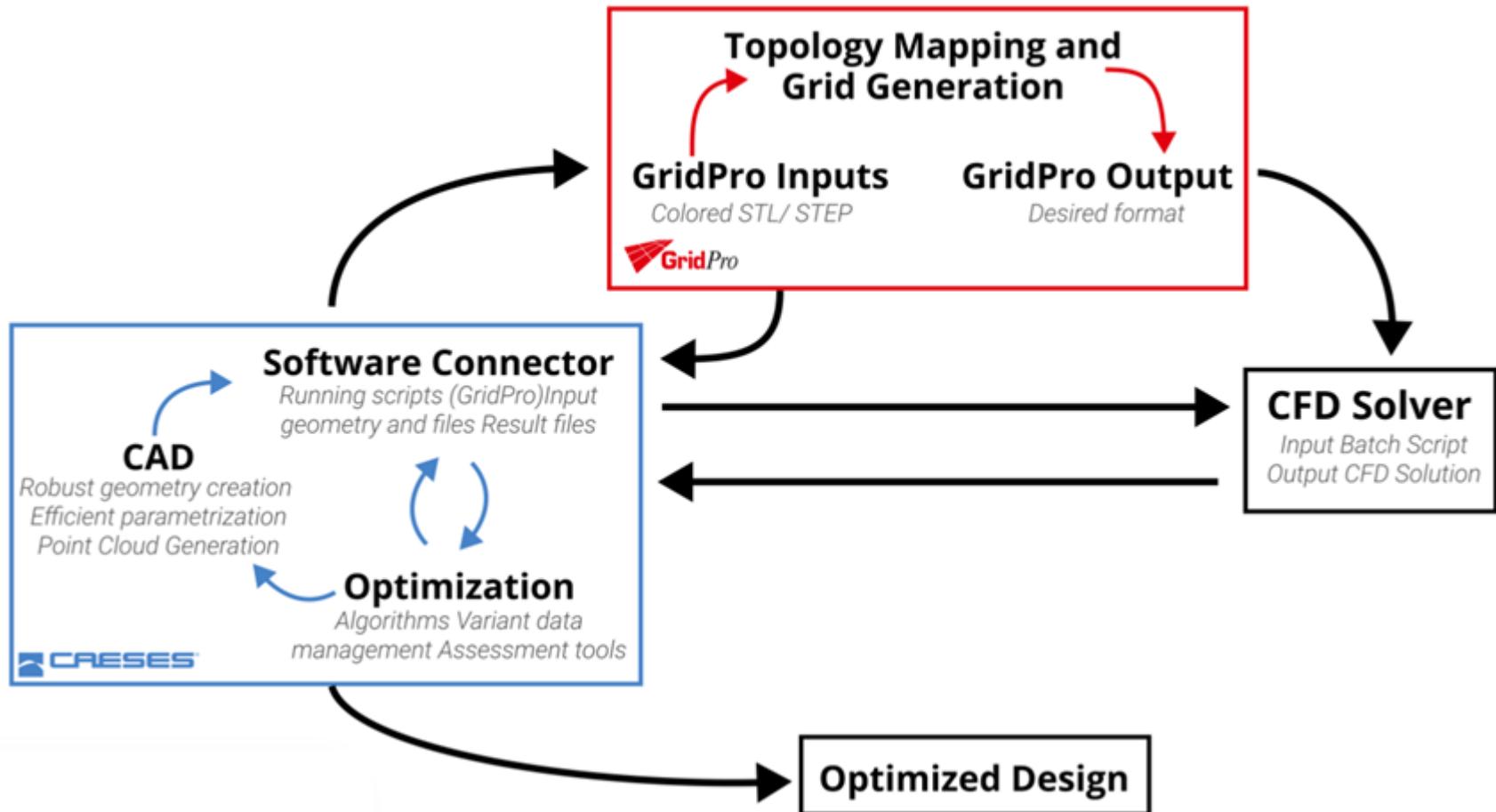
Контейнеровоз 7560TEU¹



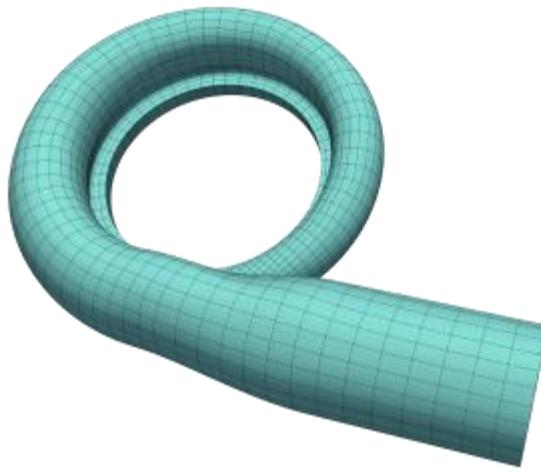
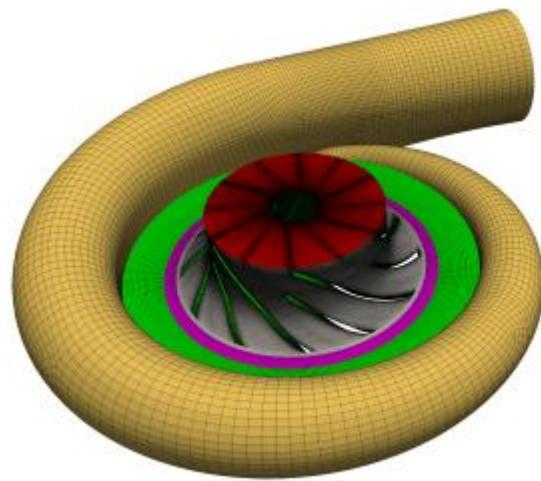
¹ Ocean Engineering 119 (2016) 262-273

GridPro – автоматический блочный hex генератор 1/5

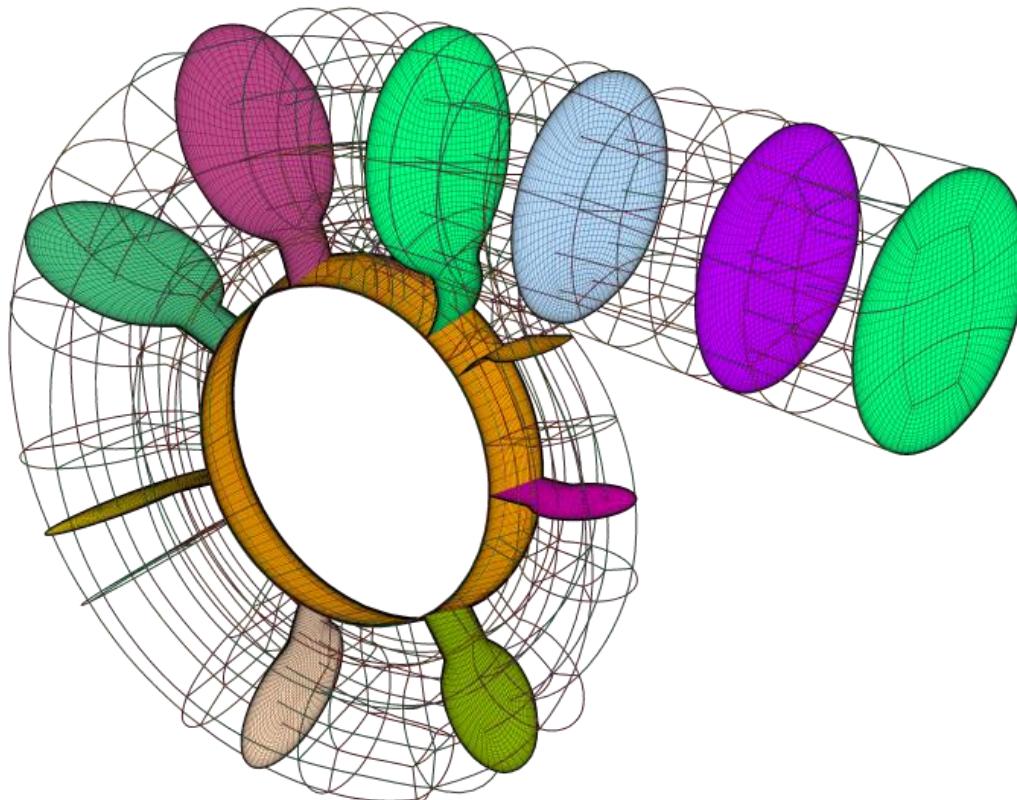
Автоматическое разбиение геометрии на блоки по имеющимся шаблонам



GridPro – автоматический блочный hex генератор 2/5

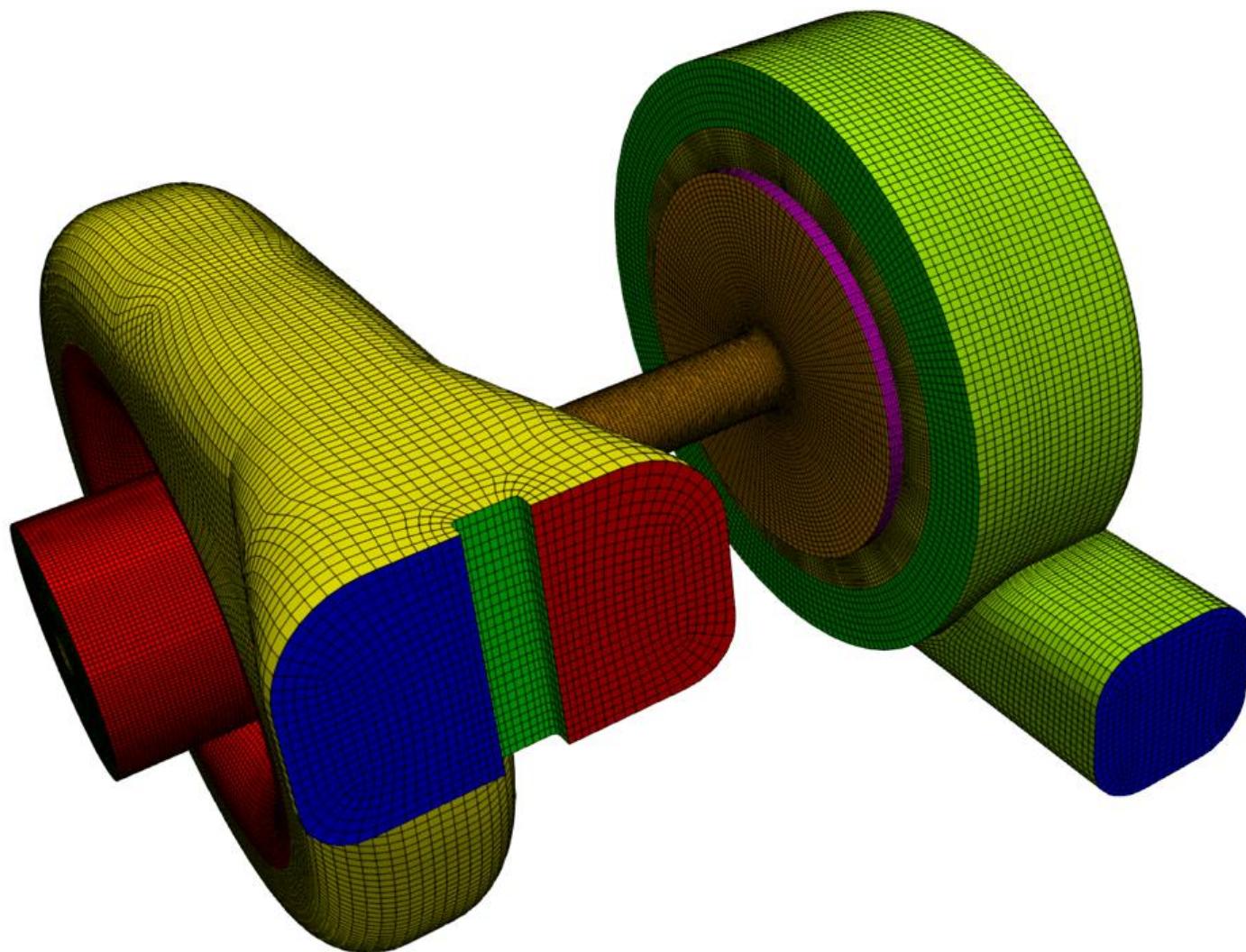


GridPro – автоматический блочный hex генератор 3/5



Построение объекта по сечениям

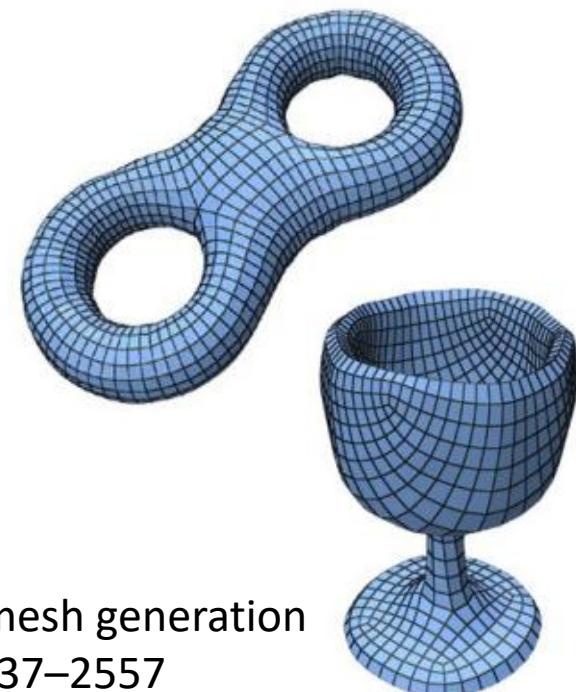
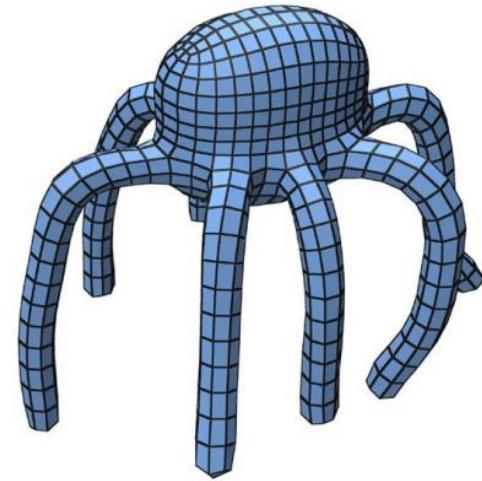
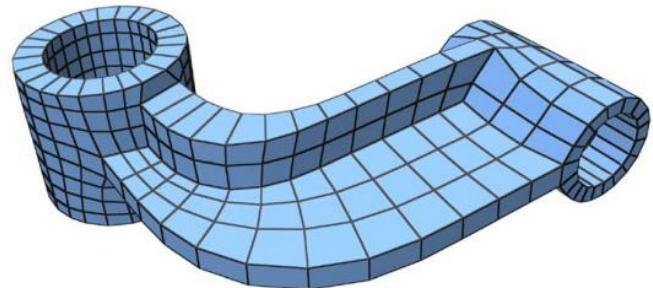
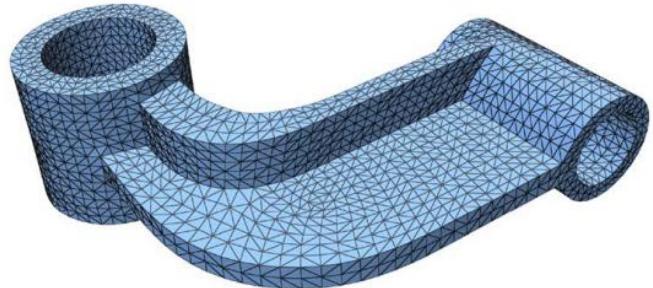
GridPro – автоматический блочный hex генератор 4/5



GridPro – автоматический блочный hex генератор 5/5



All-hexahedral meshes



Sh. Zhang et al. Medial hex-meshing: high-quality all-hexahedral mesh generation based on medial mesh. *Engineering with Computers* (2024) 40:2537–2557

Варианты развития гексаэдрального подхода

1. Автоматическая генерация неструктурированных гексаэдральных сеток
2. Полуавтоматические блочно-структурные гексаэдральные сетки с распознаванием формы тела (AI)
3. Гибридный автоматический подход: гексаэдральные ячейки пограничного слоя + гексаэдральные ячейки вдали от тела + тетраэдральная/гибридная сетка между ними
4. Ручные блочно-структурные гексаэдральные сетки

Спасибо за внимание!