



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Генератор неструктурированных многогранных сеток для тонкостенных конструкций для задач аэро- и гидродинамики в пакете программ Логос

XVI международная конференция «Забабахинские научные чтения»
г. Снежинск, май 2023

Н.В. Попова, О.Н. Борисенко, А.Г. Гиниятуллина, Е.О. Евстифеева,
М.В. Кузьменко, В.В. Лазарев, Д.М. Панкратов, Т.В. Цалко,
Е.Ю. Арапова, А.В. Тихонов

Применение методов вычислительной газовой динамики при проектировании конструкций [1, 2]

ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП

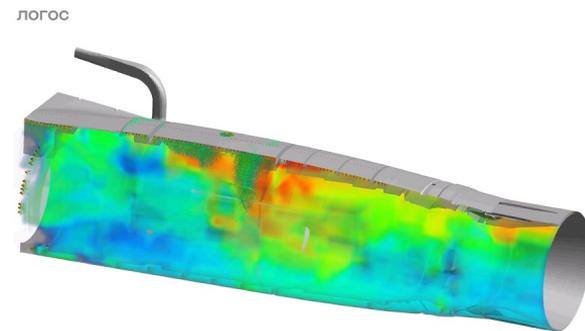
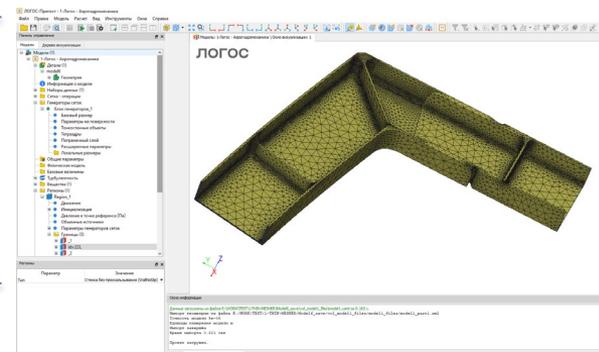
Формирование геометрии модели, формулировка физических условий, **построение сетки**, задание начальных и граничных условий

РАСЧЕТ

Численное решение основных уравнений, запись результатов решения

АНАЛИЗ

Отображение результатов решения в виде графиков, таблиц, контурных и векторных схем



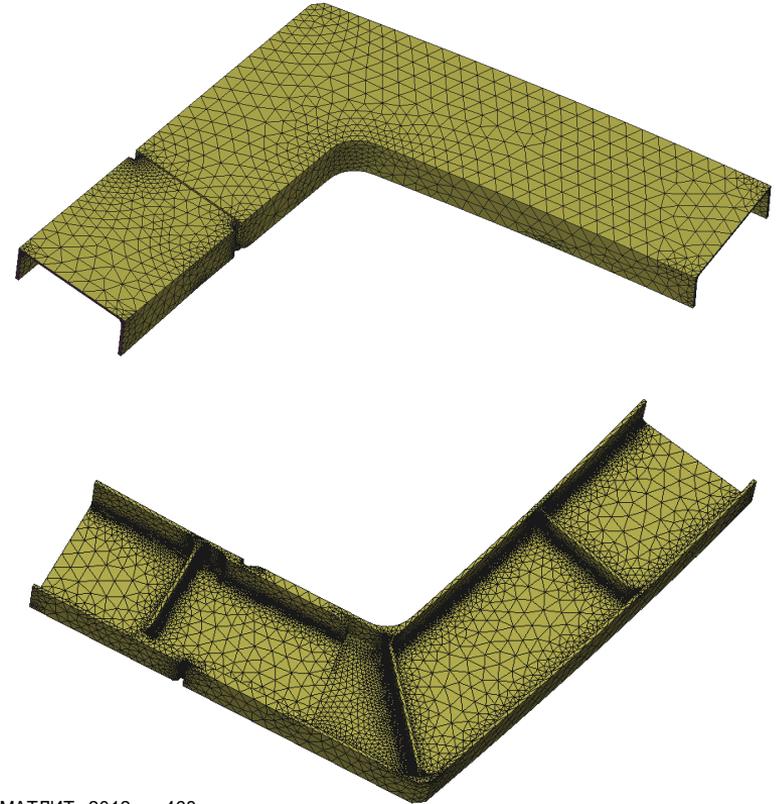
Этапы дискретизации расчетной области [1]

Анализ геометрии

Приближение топологических криволинейных ребер отрезками

Построение поверхностной сетки с адаптацией к геометрии [2]

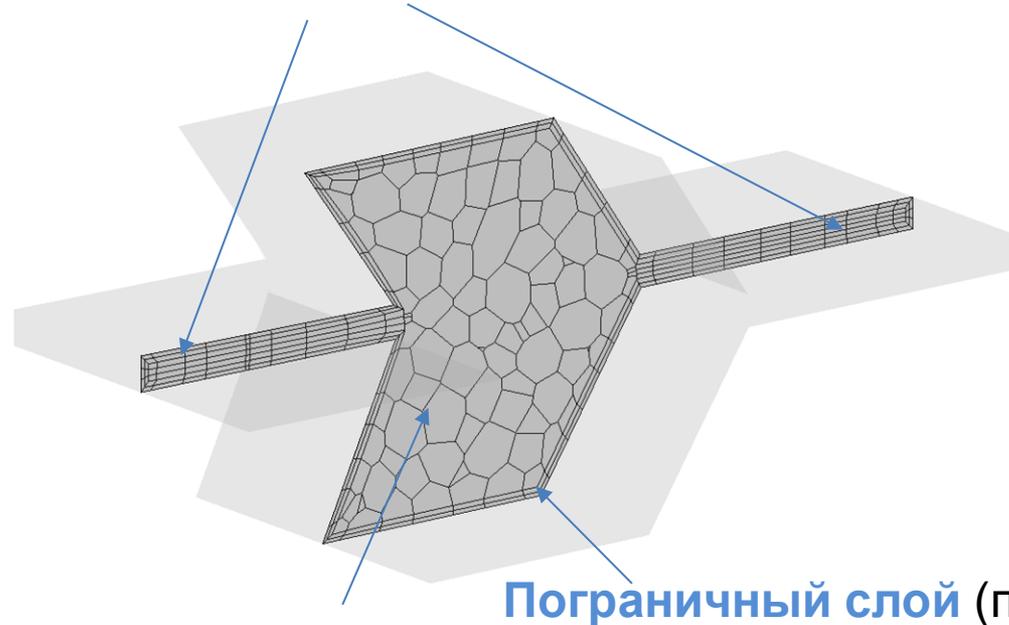
Генерация объемной сетки



1. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 468 с.
2. Борисенко О.Н., Лукичев А. Н., Евстифеева Е. О., Панкратов Д. М., Цалко Т. В., Гиниятуллина А. Г. Алгоритмы обработки особенностей геометрических моделей при построении поверхностных треугольных сеток в препроцессоре пакета программ «Логос» // ВАНТ. Сер. ММФП. - 2020. - Вып. 3. С. 40-51.

Структура расчетной сетки для тонкостенных конструкций

Тонкая область (призмы) [1,2]



Пограничный слой (призмы)

Толстая область (тетраэдры/многогранники)

1. Yin L., Luo X., Shephard M.S. Identifying and meshing thin sections of 3-d curved domains // Proceedings of the 14th International Meshing Roundtable / Springer, Berlin, Heidelberg. – 2005.
2. Lee C.K., Xu Q.X. A new automatic adaptive 3D solid mesh generation scheme for thin-walled structures // Inter. J. Numer. Meth. Engng. – 2005. – Vol. 62. P.1519-1558.

Исходные данные для построения сетки

Сетка $B = \{b_1, \dots, b_n\}$, аппроксимирующая замкнутую поверхность расчетной области треугольными ячейками, где b_i - набор ячеек поверхностной сетки, на которых заданы граничные условия и параметры генерации (граница).

Параметры для тонкостенных объектов

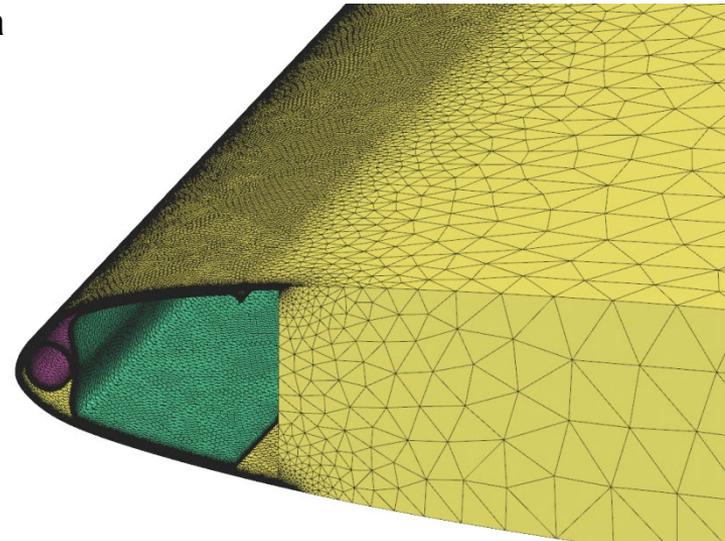
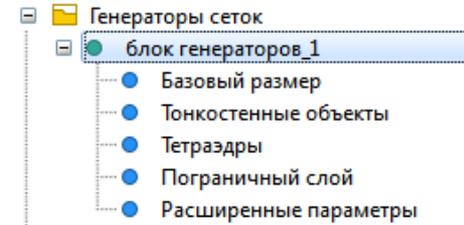
- максимальная толщина тонкой зоны
- предел отношения толщины зоны к размеру треугольника
- количество слоев
- тип ячейки (тетраэдр/многогранник)

Параметры пограничного слоя

- толщина пограничного слоя для каждой границы
- параметры растяжения
- отношение толщины к размеру на поверхности

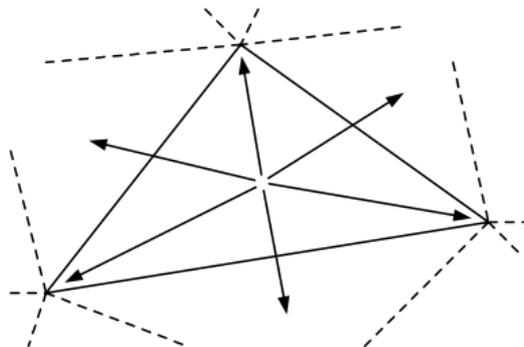
Параметры тетраэдрального генератора

- максимальный размер ячейки
- градация размера от границы



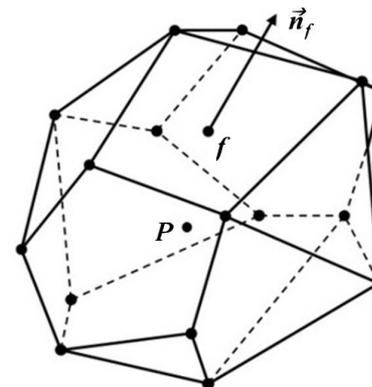
Структуры представления данных о сетке

Поверхностная сетка



- Множество узлов $P = \{p_{ij}\}, i = 3, j = \overline{1, N_P}$
- Множество треугольников $T = \{t_{ij}\}, i = 3, j = \overline{1, N_T}$
- Множество «цветов» треугольников $\{c_i^T\}, i = \overline{1, N_T}$,
«цвет» - порядковый номер границы

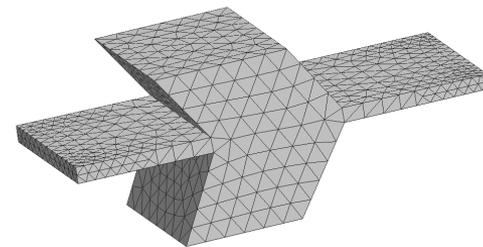
Объемная сетка



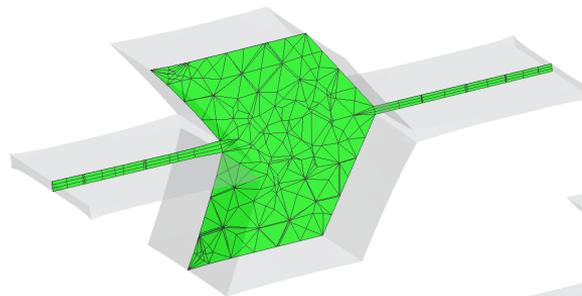
- Множество узлов $P = \{p_{ij}\}, i = 3, j = \overline{1, N_P}$
- Множество граней $F = \{f_i | f_i = \{p_j\}, i = \overline{1, N_F}\}$
- Множество ячеек $D = \{D_i | D_i = \{f_j\}, i = \overline{1, N_D}\}$
- Множество «цветов» граней $\{c_i^F\}, i = \overline{1, N_F}$

Этапы построения объемной сетки

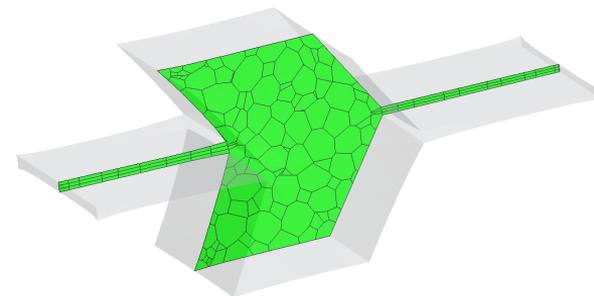
1. Диагностика поверхностной сетки
 $B = \{b_1, \dots, b_n\}$
2. Определение характерных кривых
3. Построение смещенной сетки
 $B' = \{b'_1, \dots, b'_n\}$
4. Формирование и обработка
поверхностной сетки в тонких
областях
5. Построение призматической сетки G^P
в тонких областях методом
протягивания
6. Замыкание толстых областей и
построение тетраэдральной сетки G^T
7. Согласование сеток тонкой и толстой
областей
8. Формирование многогранных ячеек
преобразованием сетки $G^P \cup G^T$
9. Построение призматических ячеек в
пограничном слое



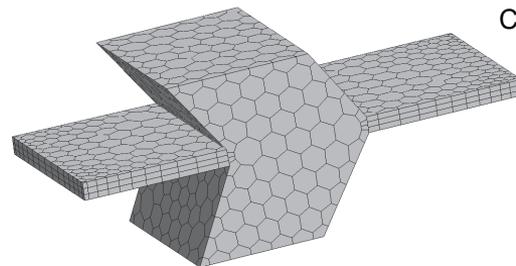
Поверхностная сетка



Сечение сетки $G^P \cup G^T$



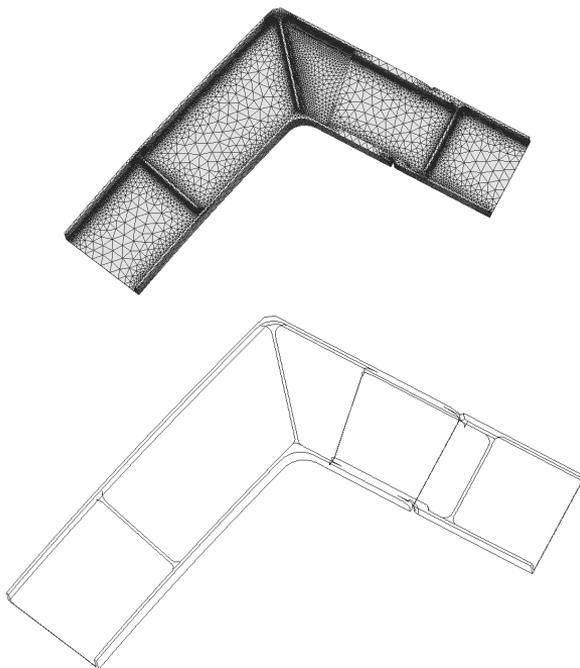
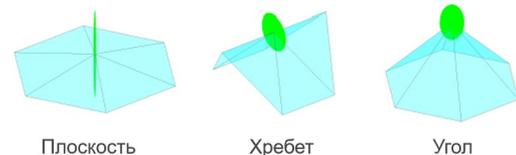
Сечение сетки $G^P \cup G^T$ после преобразования



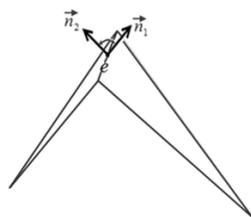
Вид поверхностных граней многогранной сетки

2. Определение характерных кривых

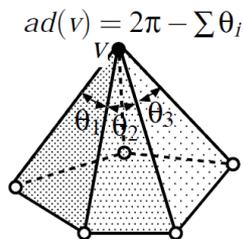
Характерные ребра – ребра треугольников поверхностной сетки, выделяющие геометрические особенности модели (острые углы, кромки, изменение кривизны поверхности). Характерная кривая – упорядоченный набор характерных ребер.



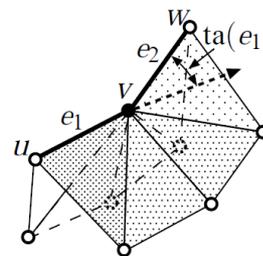
- 1) определение характерных узлов и ребер по критериям (1)-(4) [1]
- 2) определение кривизны в характерных узлах
- 3) отбор характерных ребер по замкнутости и «длине» кривой (5 ребер)



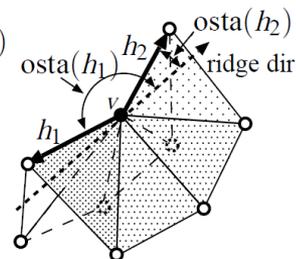
Двугранный угол
 $da > 10^\circ$ (1)



Дефицит угла в узле
 $da > 60^\circ$ (2)



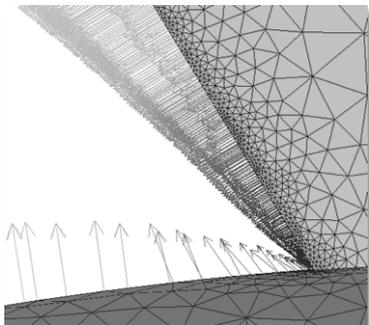
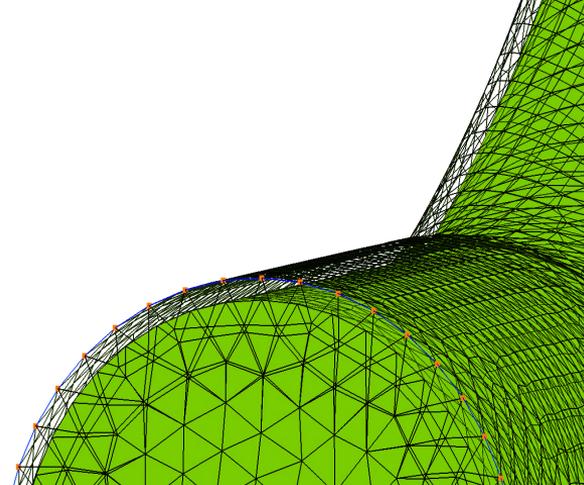
Поворотный угол
между ребрами
 $ta(e_1, e_2) > 40^\circ$ (3)



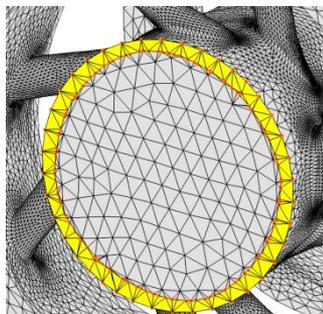
Односторонний
поворотный угол
 $osta(h_i) > 25^\circ$ (4)

3. Построение смещенной сетки [1]

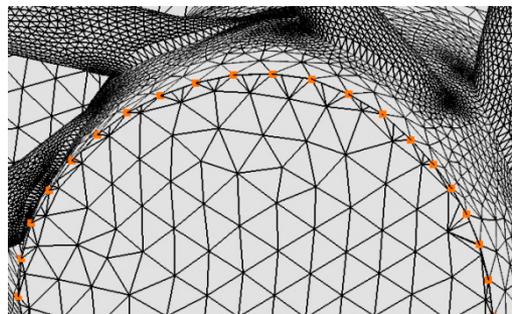
- 1) определение направления сдвига в узлах сетки $B = \{b_1, \dots, b_n\}$
- 2) определение величины смещения в узлах сетки
- 3) согласование границ со смещением и без ($b'_i \cap b_j \neq \emptyset$)
- 4) диагностика смещенной сетки $B' = \{b'_1, \dots, b'_n\}$



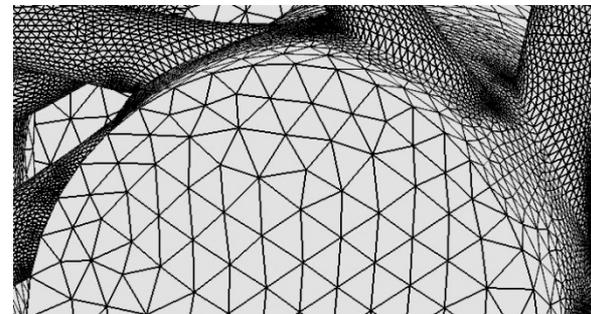
протягивание вдоль нормалей



разрезание сетки несмещаемой границы b_j по краю смещенной границы b'_i



согласование границ до локального перестроения

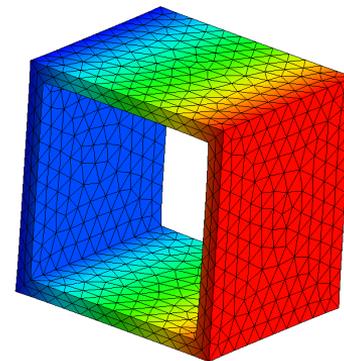


согласование границ после локального перестроения

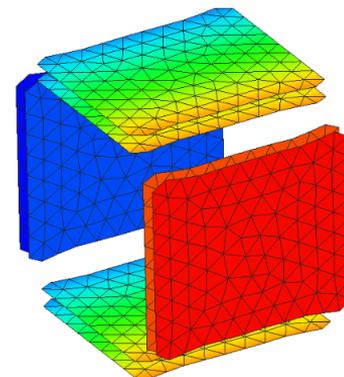
1. Лазарев В.В., Борисенко О.Н. Построение смещенной сетки для выделения пограничного слоя в пакете программ «Логос» // Суперкомпьютерное моделирование и искусственный интеллект: сборник тезисов докладов XXII международной конференции «Харитоновские тематические научные чтения» – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2021. С.81-82.

4. Формирование и обработка сетки в тонких областях

- 1) формирование пар близких треугольников смещенной сетки B'
- 2) формирование пар близких поверхностей $\{R_i \cup R_j\}$ из связанных треугольников
- 3) «отображение» сетки R_i на сетку R_j
- 4) коррекция тонких областей
- 5) формирование сетки на боковой поверхности тонкой области
- 6) оптимизация сетки

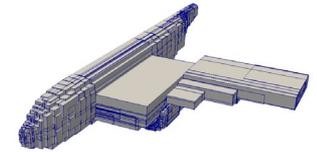


Смещенная сетка B'

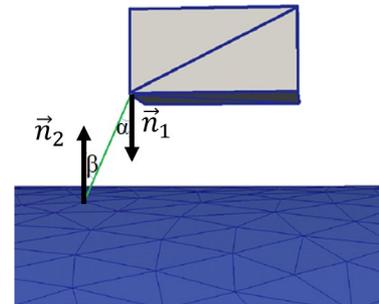
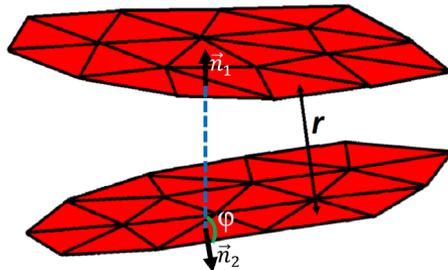


Пары близких поверхностей $\{R_i \cup R_j\}$

4.1 Поиск близких треугольников

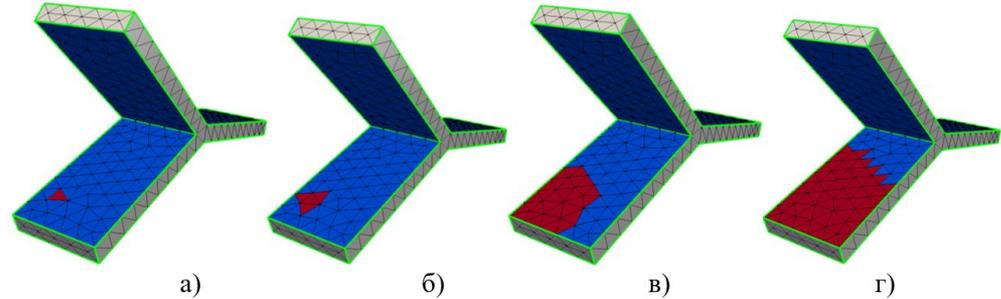


- 1) построение kd-дерева [1] для разбиения пространства и поиска геометрически узких областей
- 2) отбор треугольников по набору критериев в рамках одного блока kd-дерева:
 - минимальное расстояние между треугольниками $r < r_0$, где r_0 - заданная толщина тонкой области
 - угол между нормальными \vec{n}_1 , \vec{n}_2 треугольников $\varphi \geq \varphi_0$, где φ_0 - пороговое значение
 - смещение треугольников относительно друг друга, $\alpha < \alpha_0$ и $\beta < \alpha_0$, где α и β - углы, образованные вектором между двумя близкими узлами и нормальными \vec{n}_1 или \vec{n}_2 соответственно, α_0 - пороговое значения

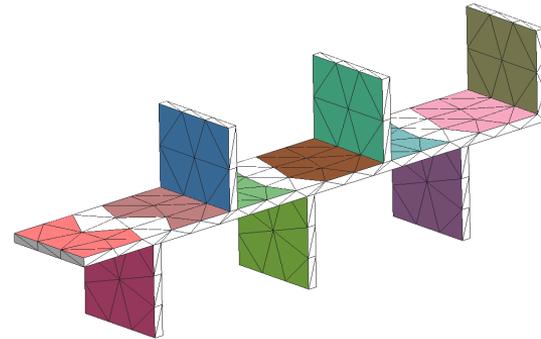


4.2 Формирование тонких регионов

- 1) формирование **связных** областей $\{R_i\}$ из множества близких треугольников с ограничением по характерным ребрам
- 2) формирование пар взаимно-однозначных **связных** областей $\{R_i \cup R_j\}$
- 3) наращивание **взаимно-однозначных** областей «свободными» треугольниками, **не** принадлежащих $\{R_i \cup R_j\}$ [2]



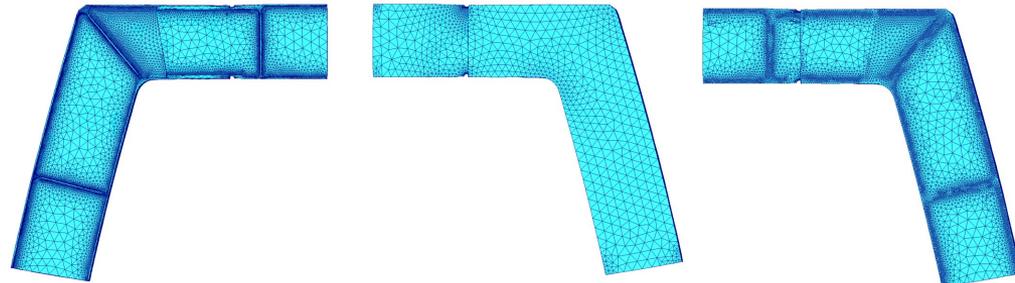
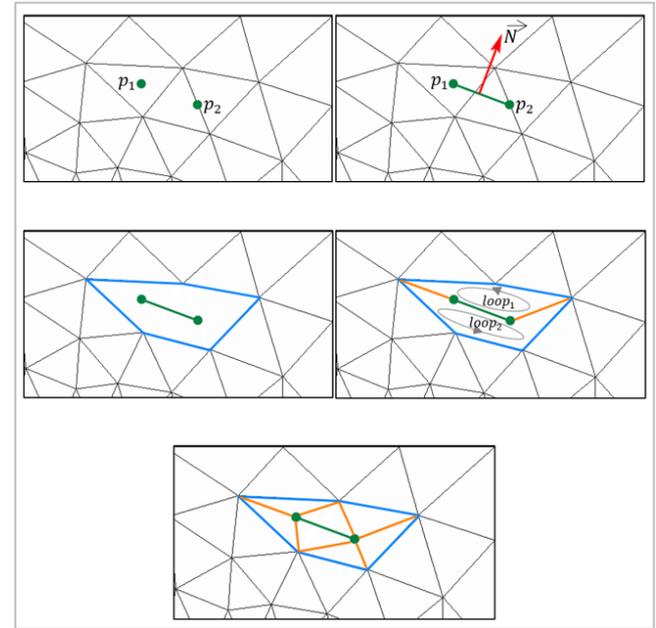
Формирование связных областей $\{R_i\}$ методом «поиска в ширину» [1]
а) 1 итерация, б) 4 итерация в) 30 итерация г) 60 итерация



Определение взаимно-однозначных областей $\{R_i \cup R_j\}$

4.3 Отображение сетки

- 1) выбор базовой R_i и целевой R_j сеток
- 2) перенос характерных ребер целевой сетки на базовую сетку
- 3) перенос ребер контуров базовой сетки на целевую сетку
- 4) перенос треугольников базовой сетки на целевую сетку
- 5) замена исходной целевой сетки на новую R'_j
- 6) локальное перестроение треугольников окружения целевой сетки R'_j

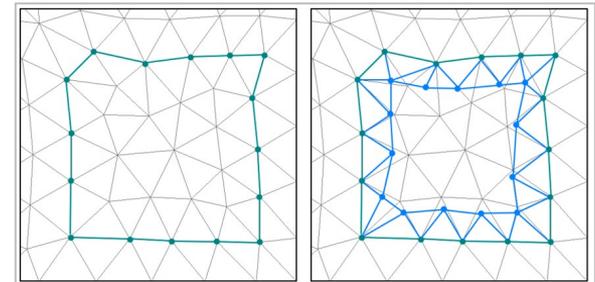


базовая сетка R_i

целевая сетка R_j

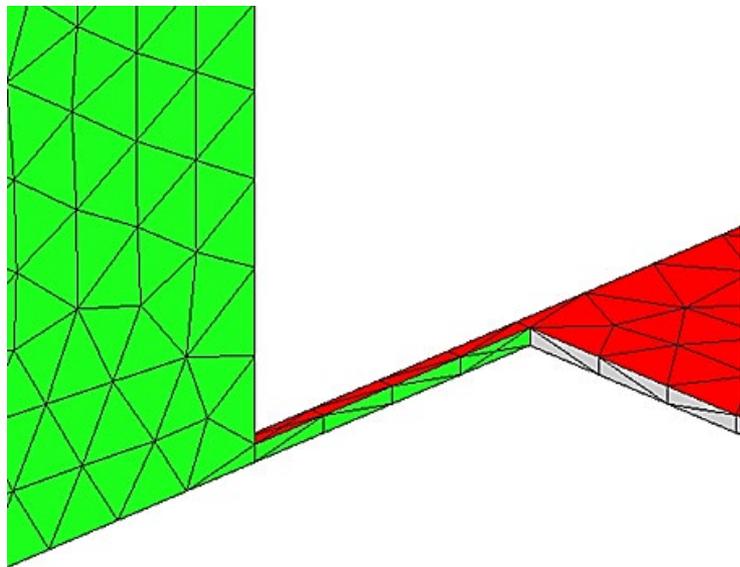
сетка R'_j
после отображения и
оптимизации

Перенос ребра

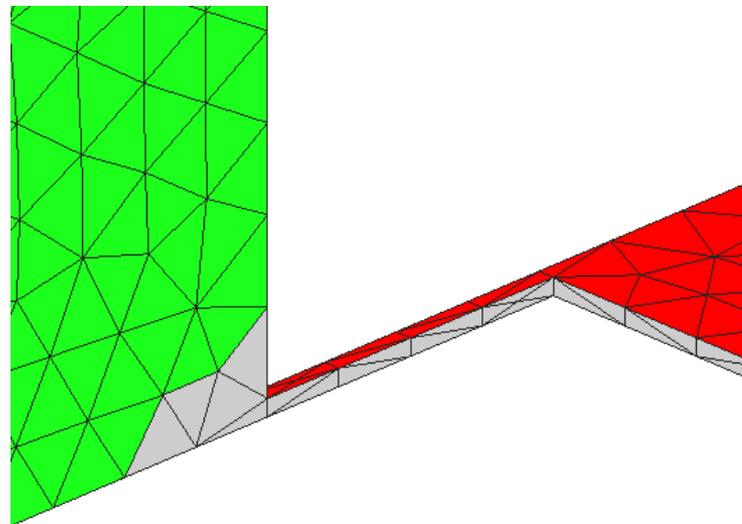


Перенос треугольников сетки (1 слой)

4.4 Удаление треугольников тонкой области



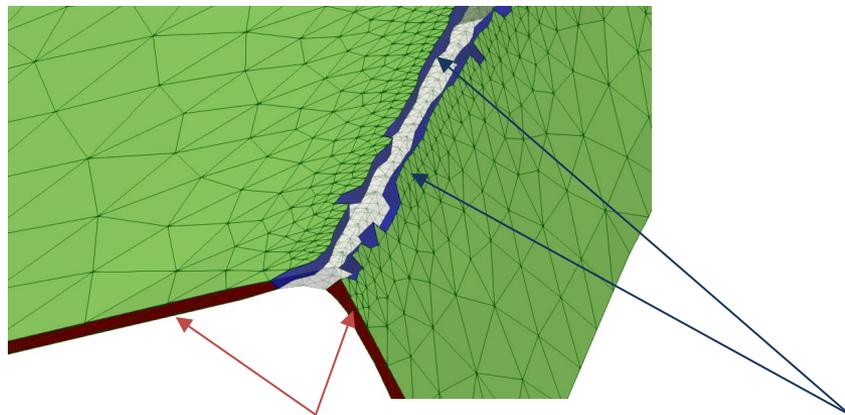
Исходная модель с
пересечением тонких регионов



Тонкие регионы после
устранения пересечений

4.5 Формирование стенок

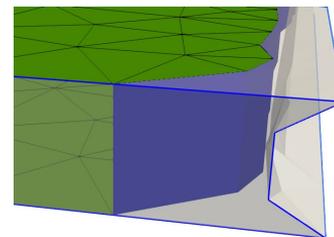
Стенка – сетка боковой поверхности тонкой области до построения объемной сетки



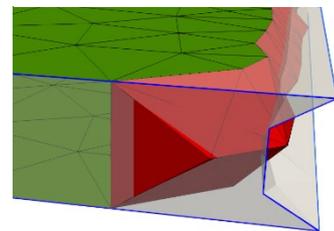
Области **внешней** **стенки** должны быть плоскими с определенной точностью, чтобы сформировать призмы G^P без самопересечений

Внутренние **стенки** должны обеспечивать «свободный» объем, достаточный для заполнения тетраэдрами G^T

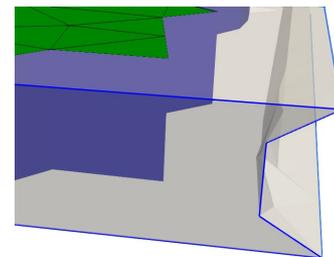
Коррекция тонкого региона



Внутренняя стенка региона

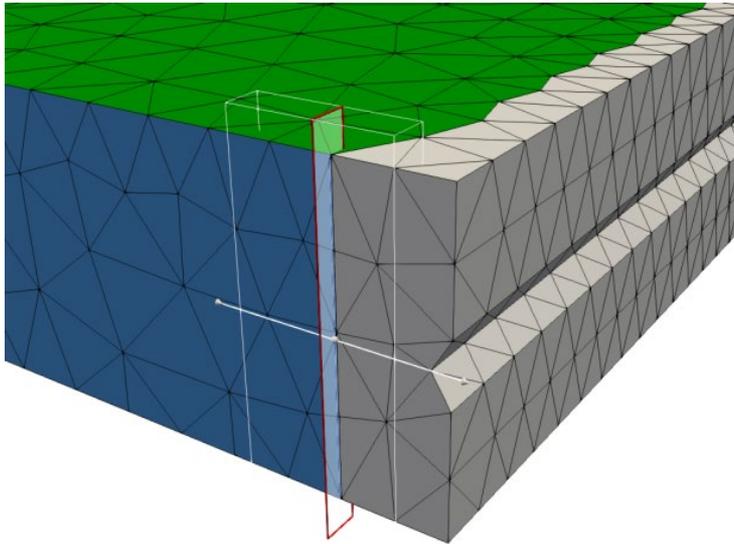


Пересечение вспомогательного тела с сеткой на поверхности

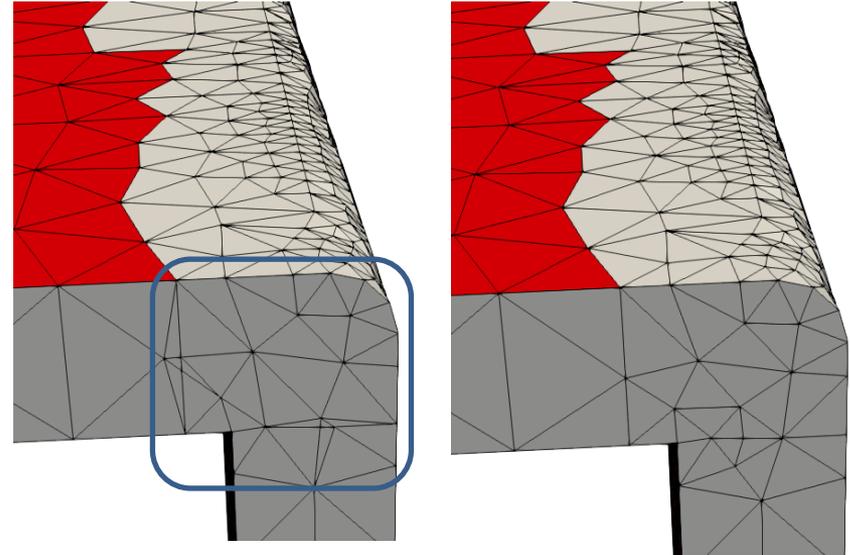


Удаление слоя треугольников из тонкого региона

4.6 Оптимизация сетки

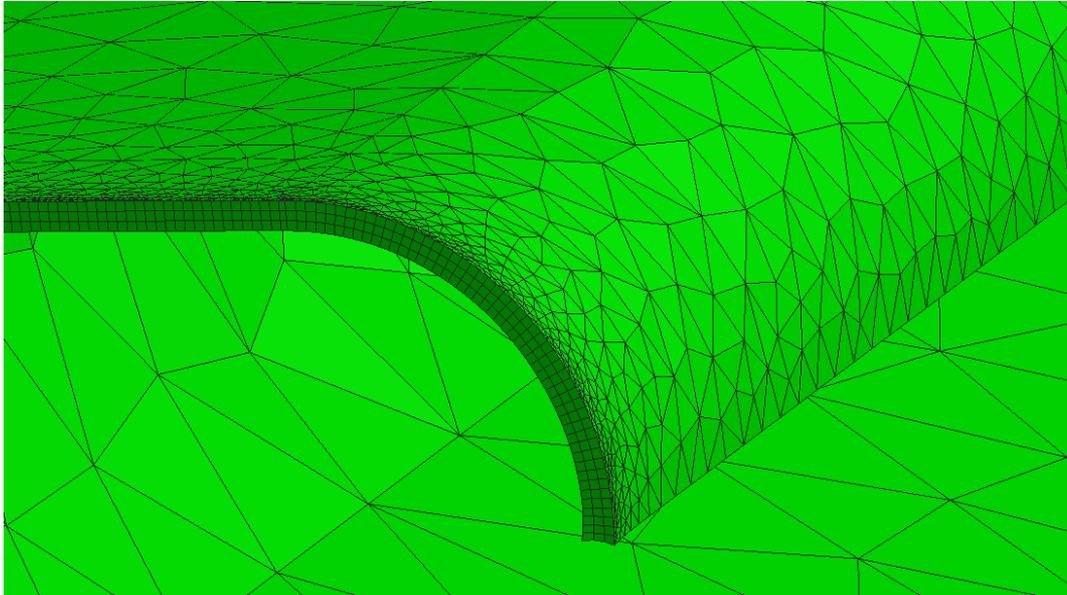


«Прорезание» плоскостью сетки боковой поверхности тонкой области необходимо для формирования призматических ячеек



Улучшение качества треугольников после «прорезания» необходимо для формирования тетраэдральных ячеек удовлетворительного качества

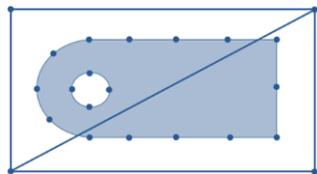
5. Построение призматической сетки G^P в тонких областях



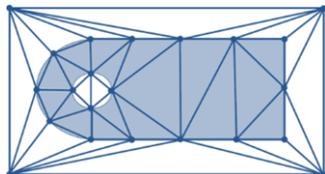
Простой алгоритм протягивания ONE-TO-ONE [1] для каждой пары близких поверхностей

Добавление треугольных граней для согласования с ячейками толстой области

6. Построение тетраэдральной сетки G^T в толстых областях



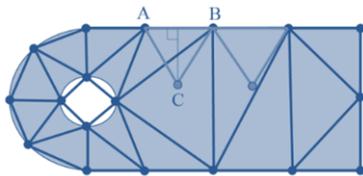
Суперобласть [1]



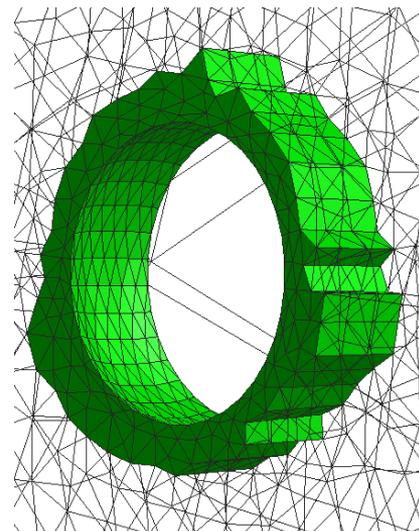
Вставка граничных узлов по критерию Делоне



Получение границ и удаление внешних элементов



Насыщение узлами методом «подвижного фронта»

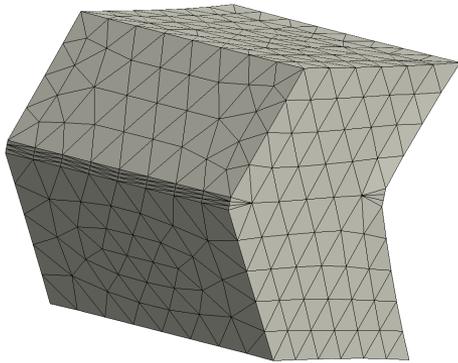


Связка метода на основе критерия Делоне и метода «подвижного фронта» [2]

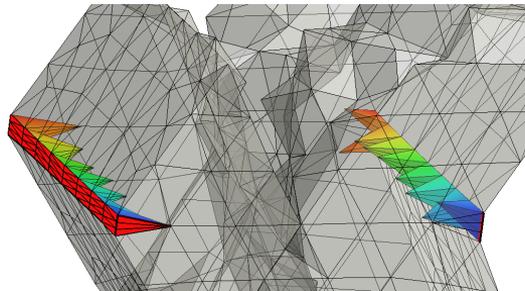
1. S. Owen. An Introduction to Mesh Generation Algorithms // 14th IMR
2. Computing objects [Electronic resource]: CM2MeshTools - Mode of Access: <https://www.computing-objects.com>

7. Согласование сеток толстой и тонкой области

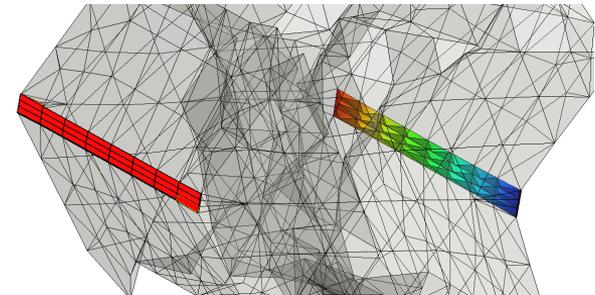
- С точки зрения моделирования течений предпочтительным является согласование ячеек сеток G^P и G^T через пирамидальный слой
- Формирование пирамид проводится за счет трансформации тетраэдров толстой области [1]



Поверхностная сетка толстой области



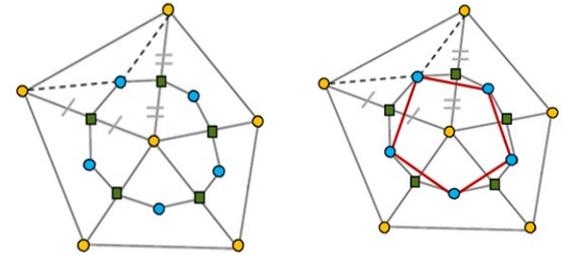
Фрагмент объемной сетки толстой области с переходным слоем из тетраэдров



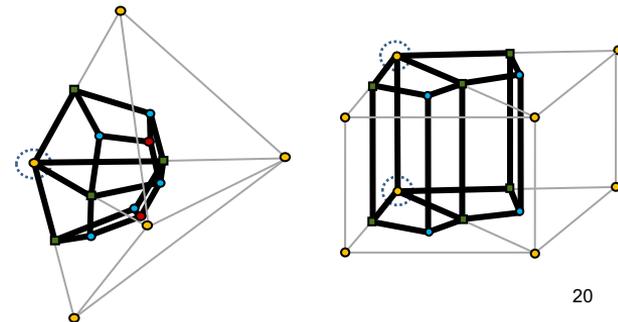
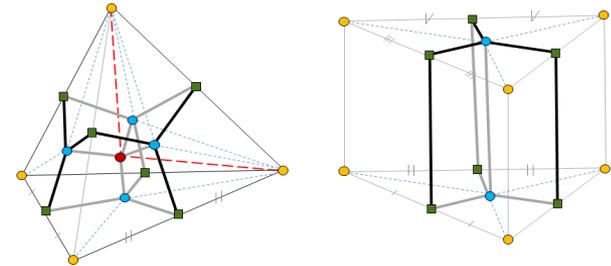
Фрагмент объемной сетки толстой области с переходным слоем из пирамид

8. Преобразование сетки $G^P \cup G^T$

- 1) классификация узлов первичной сетки $G^P \cup G^T$
 - внутренний узел
 - внешний узел на гладкой поверхности
 - внешний узел характерной кривой
- 2) вычисление координат узлов вторичной сетки
- 3) формирование ячеек вторичной сетки
 - вокруг каждого узла тетраэдральных ячеек
 - вокруг каждого ребра призматических ячеек, соединяющего треугольные основания

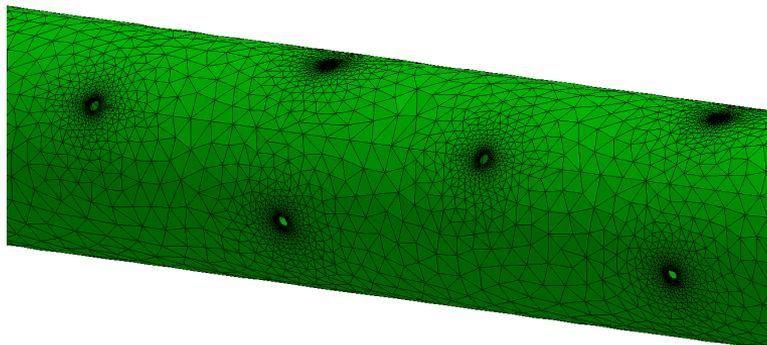


median dual, centroid dual [1]

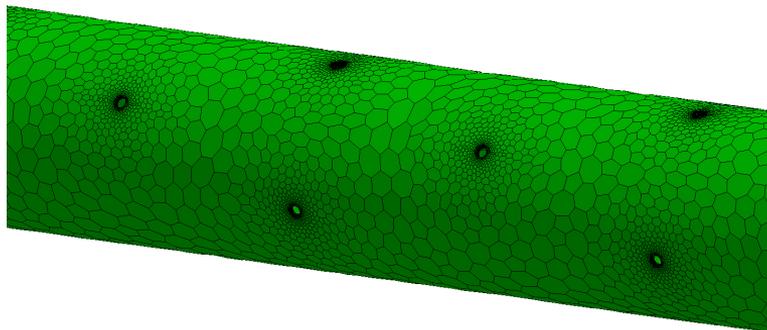


1. Barth T. J. Aspects of unstructured grids and finite-volume solvers for the Euler and Navier–Stokes equations // VKI Lecture Series. — Belgium: VonKarman Institute for Fluid Dynamics, 1994. — No. 1994-05. — 152 p.
2. Попова Н. В. Автоматический генератор неструктурированных многогранных сеток на основе тетраэдральных сеток с призматическими слоями // ВАНТ. ВАНТ. Сер. ММФП. - 2021. - Вып. 3. С. 70-83.

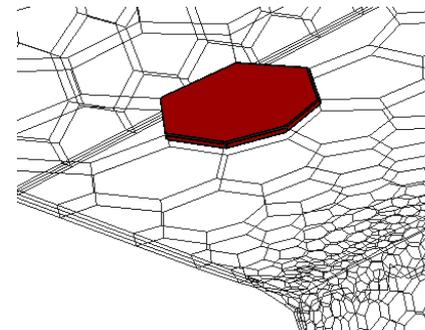
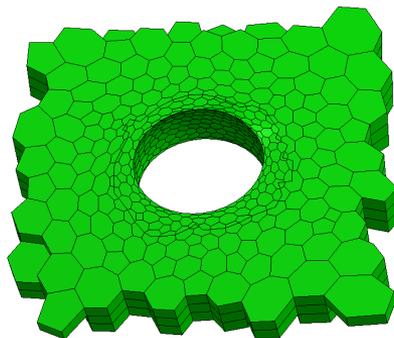
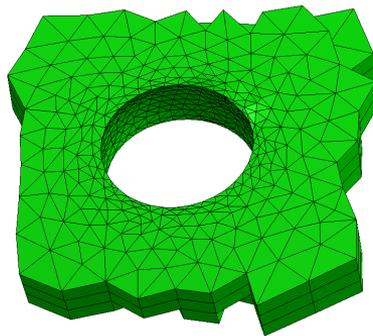
8. Преобразование сетки $G^P \cup G^T$



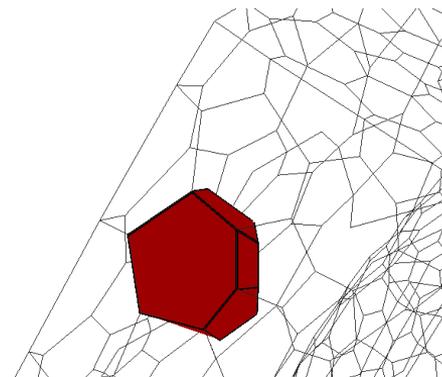
Фрагмент сетки до преобразования



Фрагмент сетки после преобразования



Ячейка тонкой области
после преобразования



Ячейка толстой области
после преобразования

9. Построение призматических ячеек с изменением количества слоев

- Координаты узла промежуточного слоя с учетом коэффициента сгущения q

$$\vec{v}_i = \vec{v}_B + (\vec{v}_{B'} - \vec{v}_B) \cdot \sigma_i,$$

$$\begin{cases} \sigma_i = \frac{i}{N}, & q = 1 \\ \sigma_i = \frac{q^i - 1}{q^N - 1}, & q \neq 1, \quad i = \overline{1, N-1} \end{cases}$$

- Размер ячейки у стенки с учетом толщины слоя D

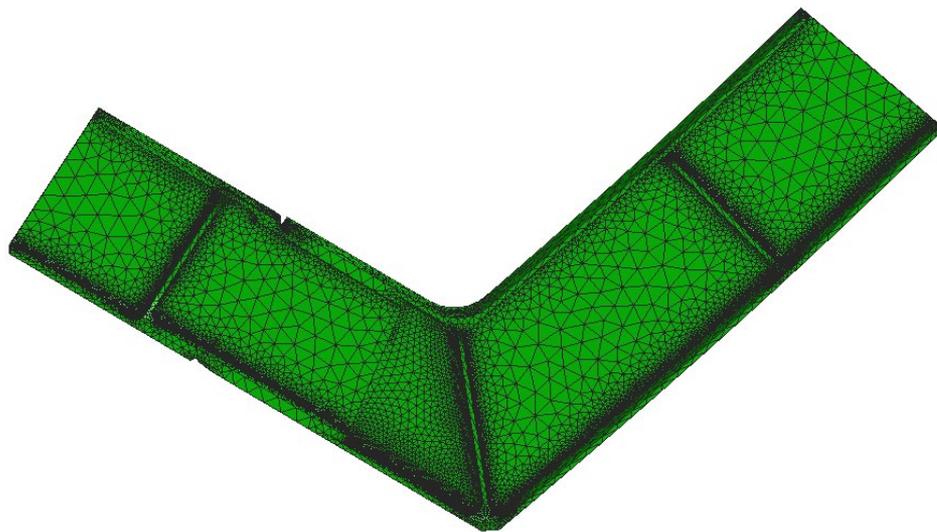
$$D_{FirstCell} = \frac{D(1-q)}{(1-q^{N+1})}$$

- Количество слоев в зонах поджатия пограничного слоя с учетом толщины слоя в узле D_i

$$N_i = \log_q \left(1 - \frac{D_i(1-q)}{D_{FirstCell}} \right)$$

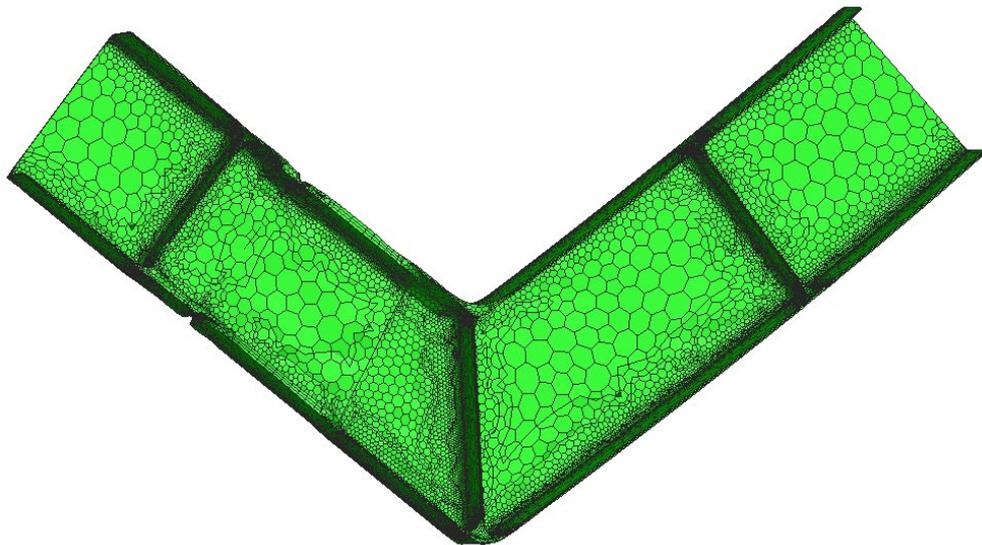


Пример построения объемной сетки

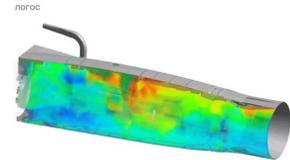


Поверхностная сетка	34 тыс. ячеек, 17 тыс. узлов
Размеры габаритов расчетной области	dX: 0.0295000076 dY: 0.3188302516 dZ: 0.2770430445
Базовый размер	0,1
Параметры на поверхности	
Целевой размер	0,01
Минимальный размер	0,001
Тонкостенные объекты	
Максимальная толщина тонкой зоны	0,05
Предел отношения толщины к размеру треугольника	2,5
Количество слоев	3
Параметры пограничного слоя	
Коэффициент сгущения	1,2
Количество слоев	10
Толщина пограничного слоя	0,004

Пример построения объемной сетки



Количество тонких областей	75
Объемная сетка	240 тыс. ячеек 1 млн. граней 633 тыс. узлов
Время построения	1.3 мин.
Пиковый расход ОП	650 МБ
Характеристики ПК	Intel(R) Core(TM) i7-9700 CPU @ 3.00GHz 3.00 GHz 64 GB RAM



Заключение

Генератор объемных сеток для тонкостенных конструкций является автоматическим (исключение ручного режима ускоряет подготовку задачи к расчету)

Предназначен для решения задач аэро- и гидродинамики

(в частности, для задач расчета течения, испарения, воспламенения капель авиационного керосина, масла, гидравлической жидкости, расчета испарения огнегасительного вещества и тушения пламени в пожароопасном отсеке)

Подходит для промышленных конструкций сложной конфигурации

Сквозная цепочка (построение поверхностной сетки, затем расчетной сетки) позволяет использовать ранее созданную модель для вариативности в рамках одной задачи с минимальными усилиями

Спасибо за внимание

Попова Наталья Васильевна
Старший научный сотрудник
Институт Теоретической и Математической Физики

Тел.: 8 (83130) 2 75 38, доб. 1134
Моб. тел.: +7 (920) 291 83 85
E-mail: NVPopova@vniief.ru
www.vniief.ru

22.03.2023

