



РФЯЦ-ВНИИЭФ  
РОСАТОМ

# МЕТОДЫ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК ИЗ ПРОИЗВОЛЬНЫХ МНОГОГРАННИКОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ АЭРО- И ГИДРОДИНАМИКИ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ЛОГОС

Забабахинские научные чтения 2023

*Докладчик Кузьменко Милана Владимировна*

*Соавторы О. Н. Борисенко, К. А. Блажнова, Т. Е. Тимаева*

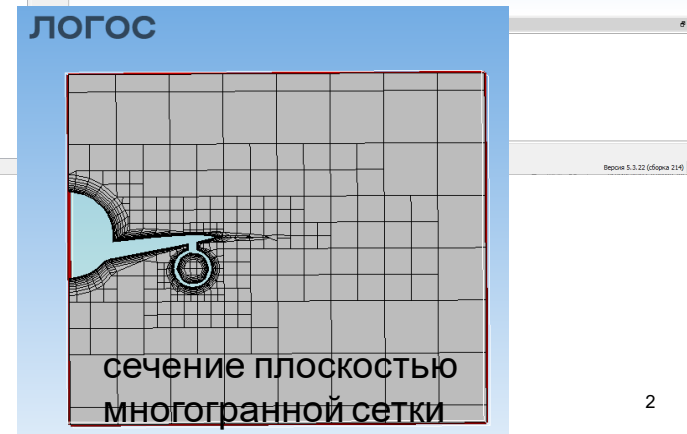
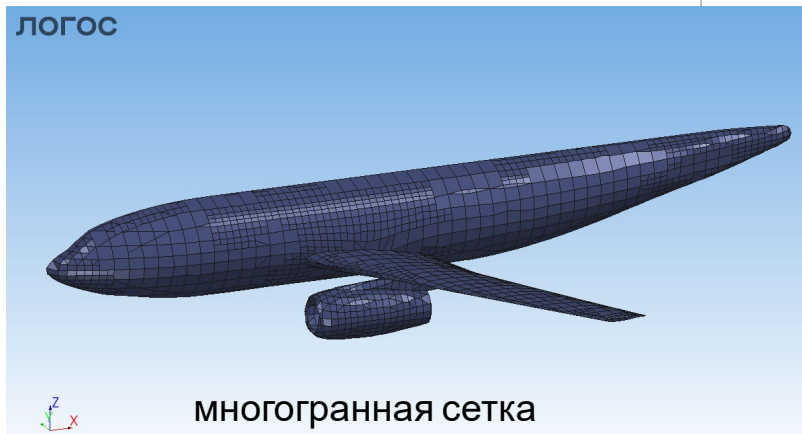
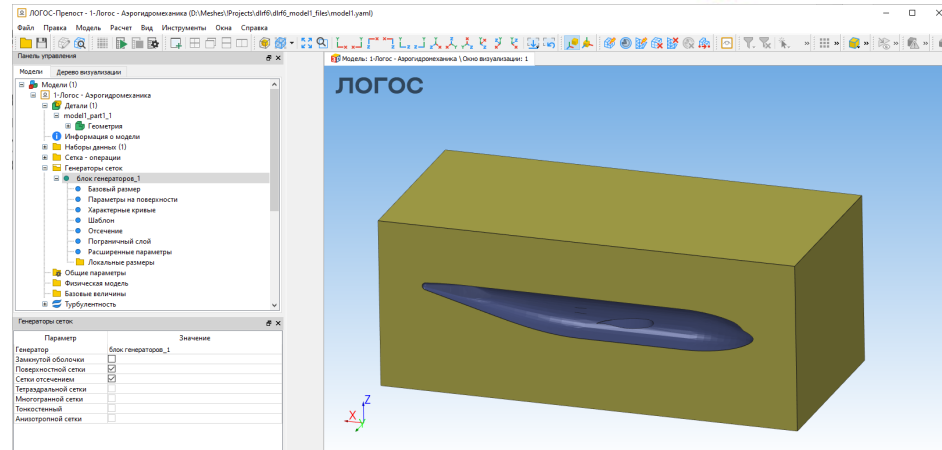
# ПреПостПроцессор «Логос»

## ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП:

- формирование геометрии модели;
- формулировка физических условий;
- **построение сетки;**
- задание начальных и граничных условий

## РАСЧЕТ

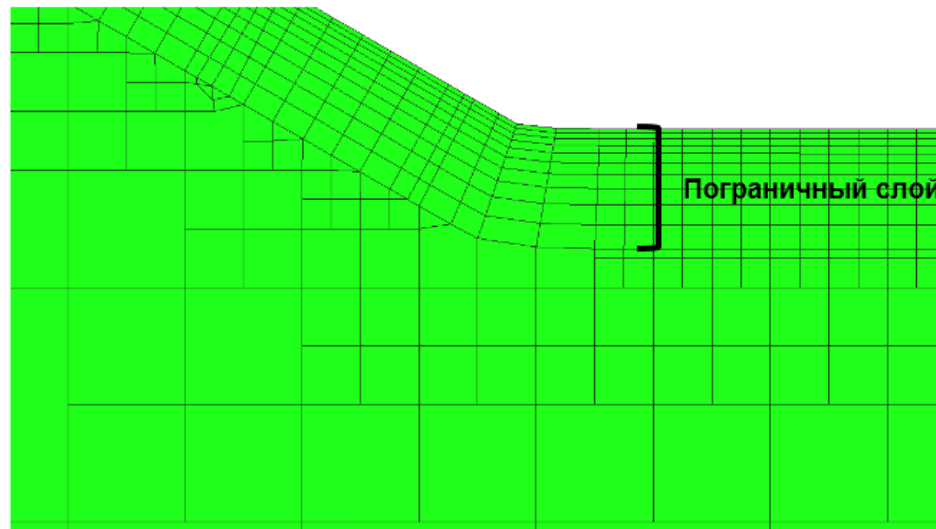
## АНАЛИЗ



# ПреПостПроцессор «Логос»: Структура сетки для моделирования задач аэро- и гидродинамики

Для моделирования задач аэрогидромеханики требуются сетки специального вида с неоднородной структурой\*, состоящие из ячеек двух типов:

- ячейки пограничного слоя – слой ячеек в форме многогранных призм на поверхности обтекаемого тела вблизи моделируемого объекта
- ячейки, заполняющие остальную область моделирования – в общем случае могут иметь форму произвольного многогранника



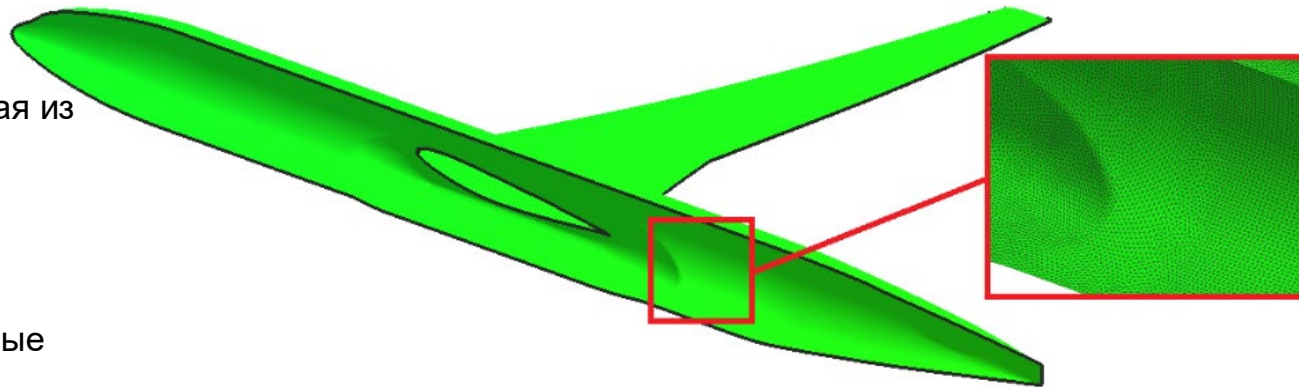
# ПреПостПроцессор «Логос»: Генератор неструктурированных сеток методом отсечения\*

Исходные данные:

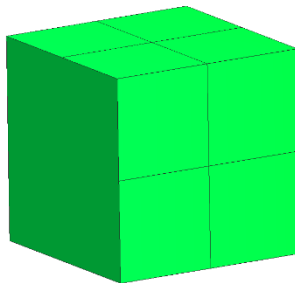
- поверхностная сетка, состоящая из треугольных ячеек
- характерные кривые

Типы ячеек:

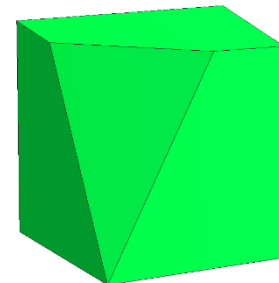
- ячейки в форме куба (шаблонные ячейки)
- многогранные ячейки произвольной формы (отсеченные ячейки)
- многоугольные призмы (призматические ячейки)



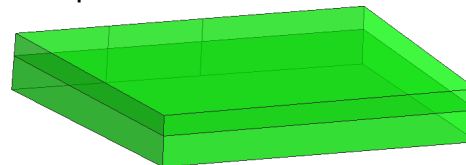
Шаблонная ячейка



Отсеченная ячейка



Призматические ячейки



# Методы оценки качества

## Топологические критерии

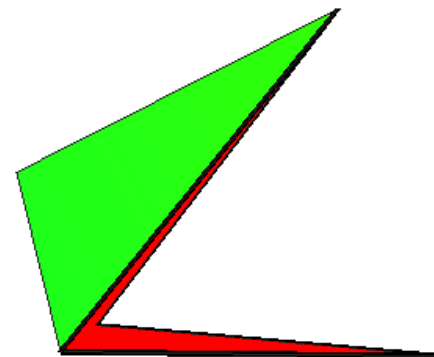
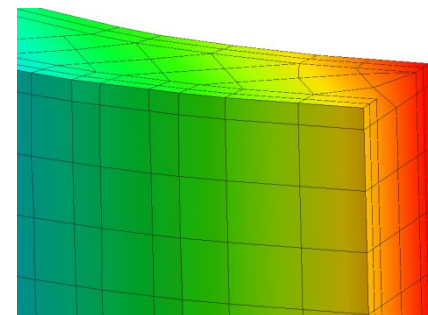
- Свободные ребра
- Свободные грани
- Количество граней ячейки  $< 4$
- Количество узлов грани  $< 3$

## Геометрические критерии

- Незамкнутость ячейки
- Самопересечение граней
- Соотношение объемов/площадей
- Искривленность граней
- Невыпуклость ячейки
- Вырожденность граней/ячеек
- Отношение длин ребер
- Ортогональность
- Асимметричность

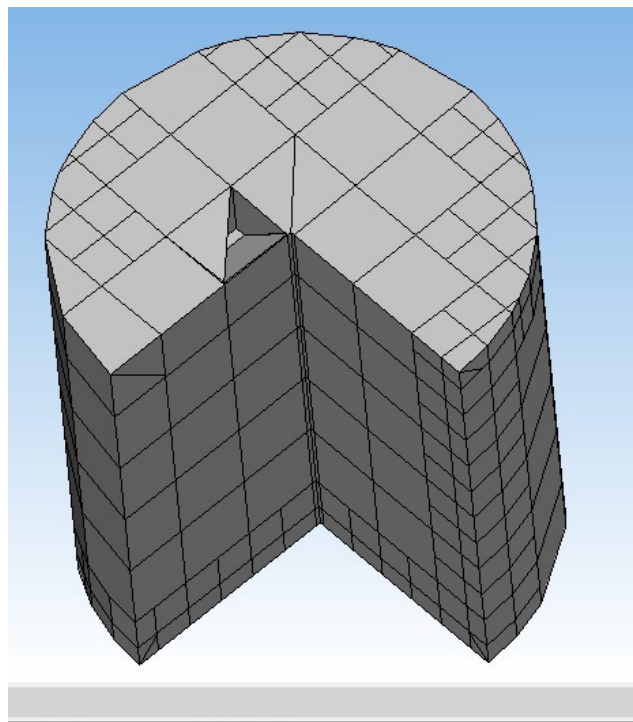
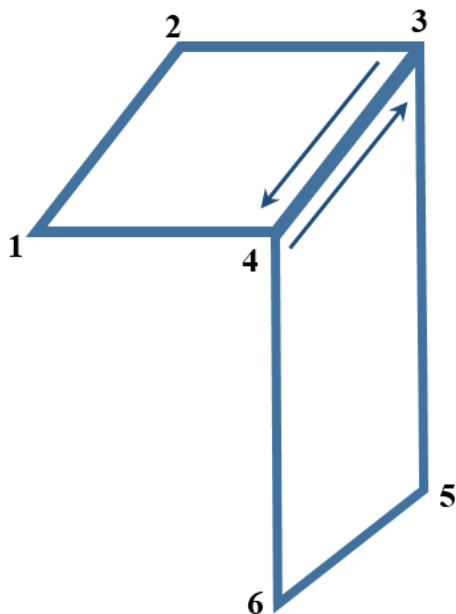
## Проверка характерных особенностей модели

- По поверхностной сетке
- По многогранной сетке



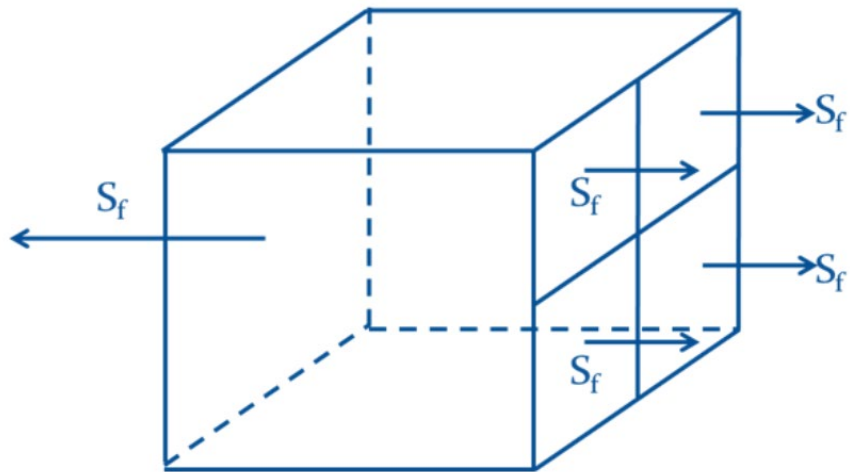
# Топологические критерии: Свободные ребра

Ребро должно принадлежать минимум двум граням



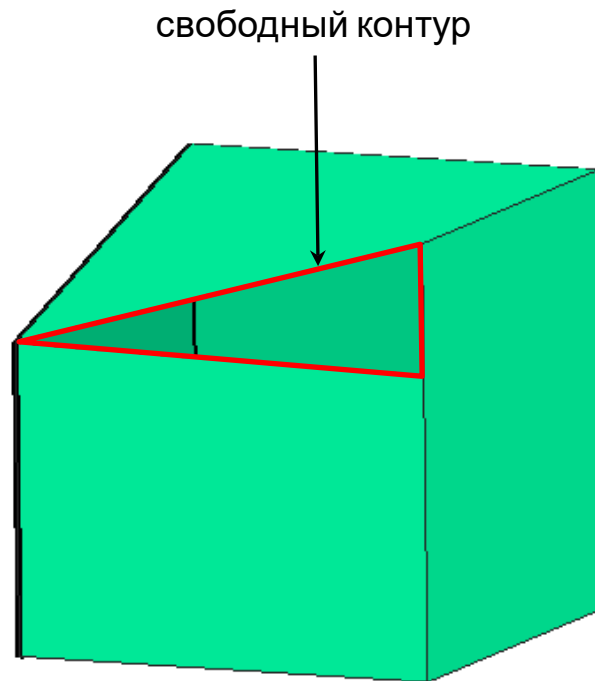
Анализ качества сетки: **Свободные ребра**  
Число свободных ребер сетки: 3  
Данные о первых 10 свободных ребрах  
Ячейка № 725 Свободное ребро: 388 909  
Ячейка № 725 Свободное ребро: 388 936  
Ячейка № 725 Свободное ребро: 909 936

# Геометрические критерии: Незамкнутость ячеек



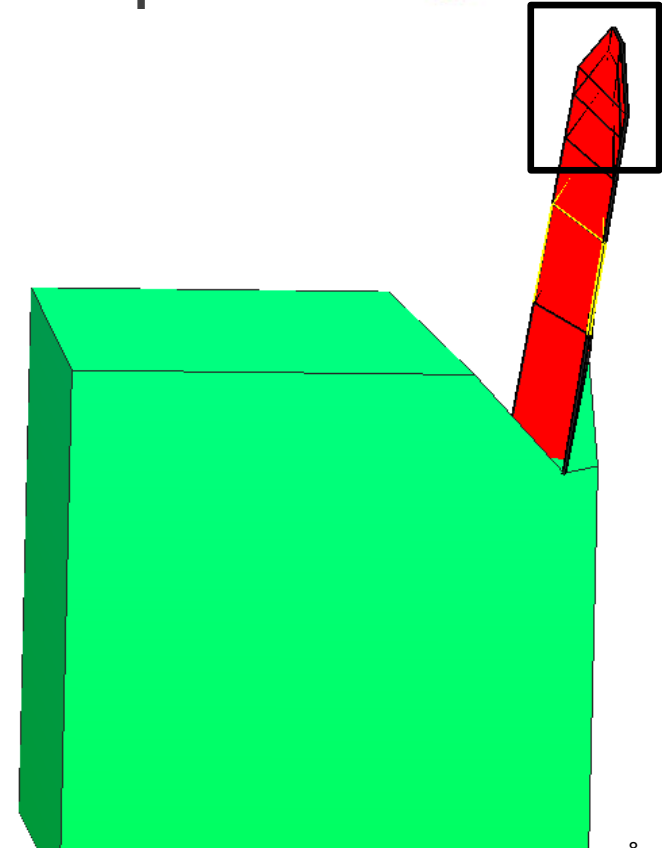
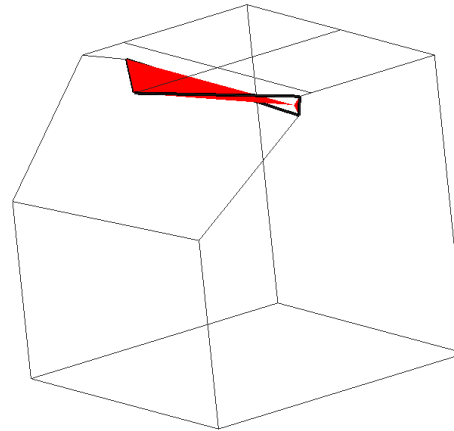
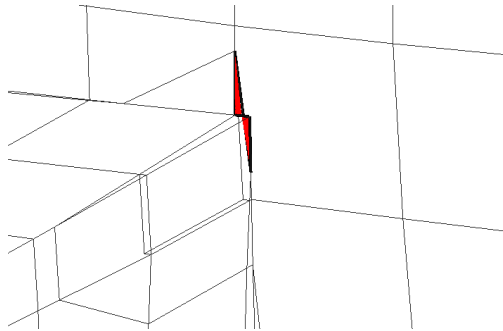
$$\sum S_f > \varepsilon$$

$S_f$  - нормаль грани



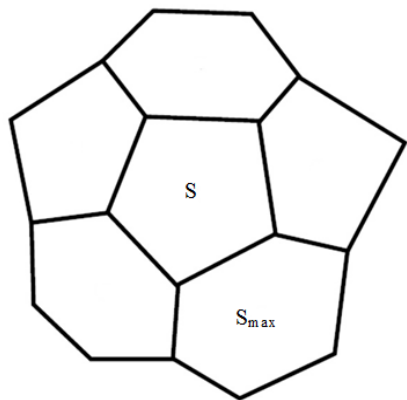
# Геометрические критерии: Самопересечение граней

- 1) определение нормали к многоугольной грани:
  - по методу Ньюэлла;
  - в соответствии с направлением формирования призматических ячеек;
- 2) проецирование узлов грани на плоскость;
- 3) проверка пересечения спроецированных ребер грани в плоскости.

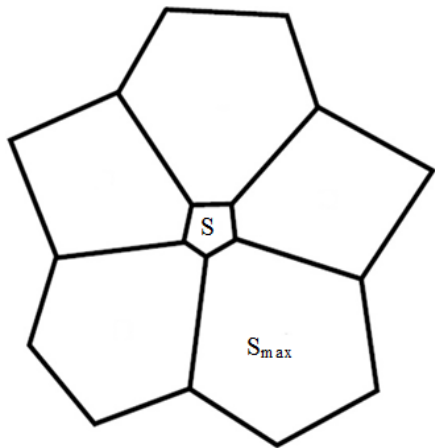




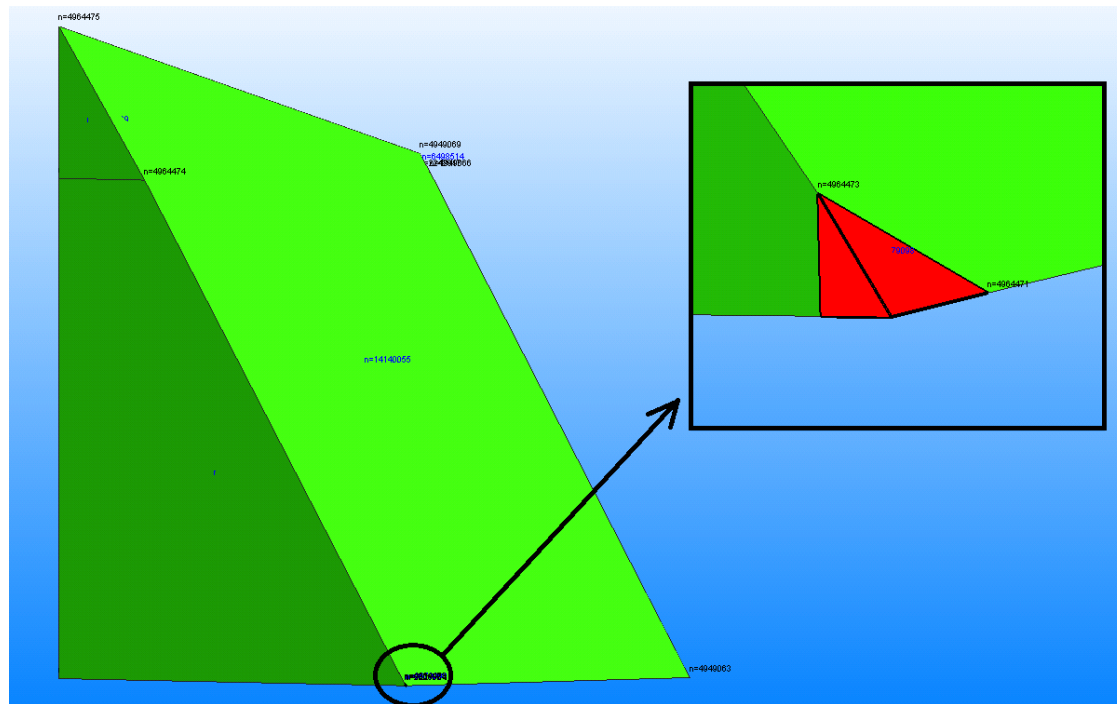
# Геометрические критерии: Соотношение площадей и объемов



$$\frac{S_{max}}{S} > 10^4$$



$$\frac{V_{max}}{V} > 10^4$$

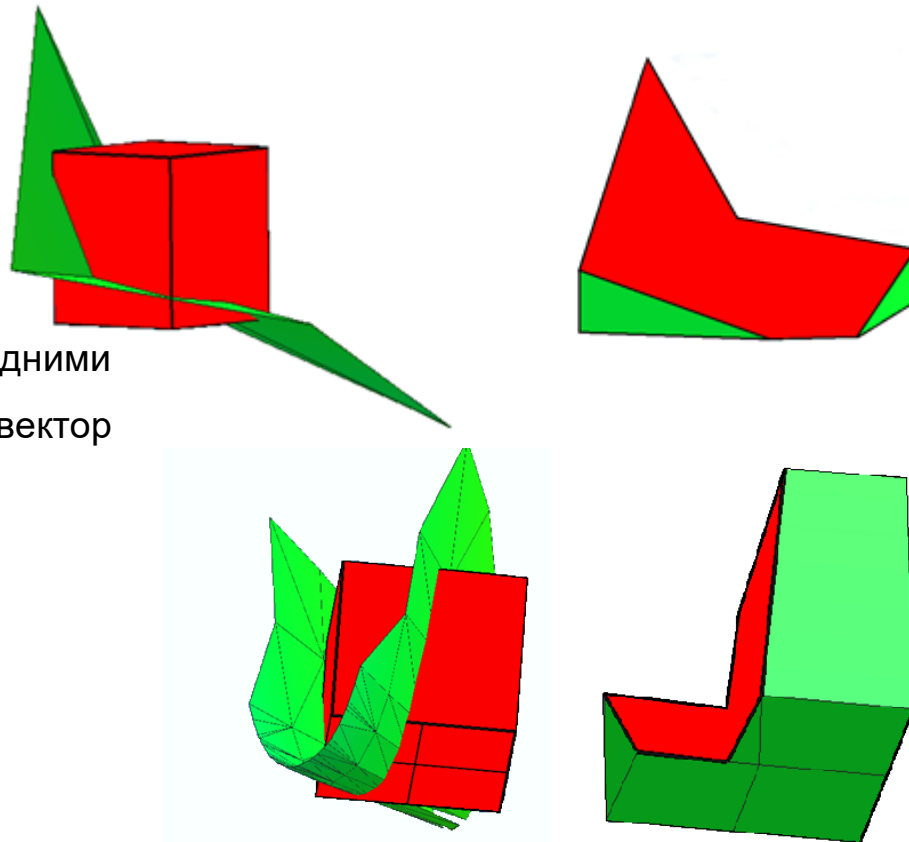


# Геометрические критерии: Искривленность граней

$$2 \cdot \arctg\left(\frac{d}{\sqrt{S}}\right) > 50^\circ,$$

$d$  – максимальное расстояние между соседними узлами грани, умноженное на единичные вектор нормали грани

$S$  – площадь грани

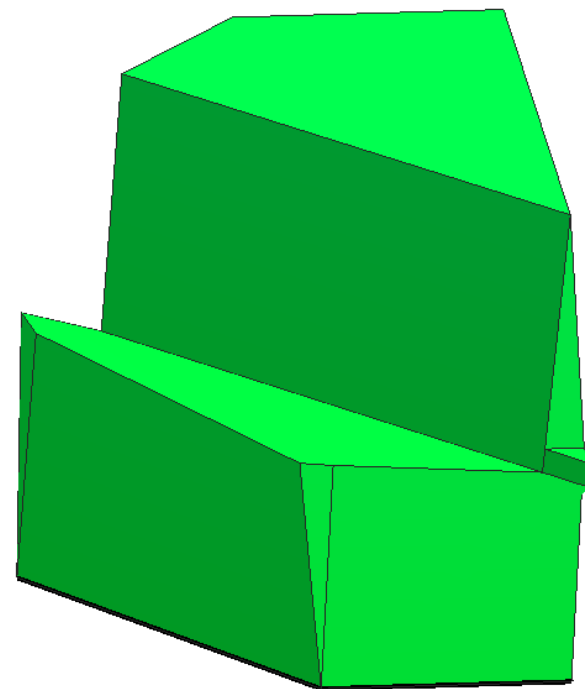
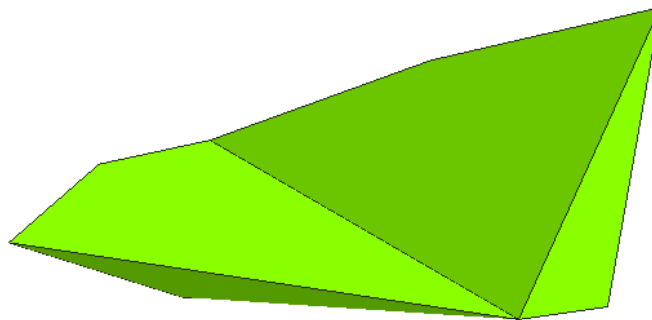


# Геометрические критерии: Невыпуклость ячеек

$$(CV, fn) < 0,$$

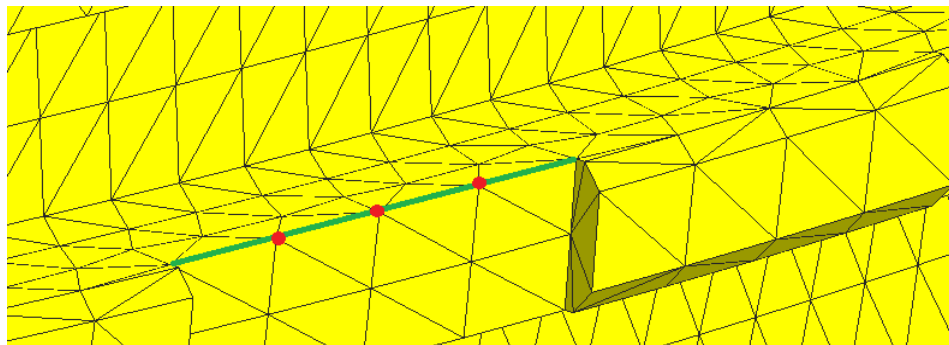
$CV$  – центральный вектор (центр грани – центр ячейки)

$f_n$  – нормаль к грани

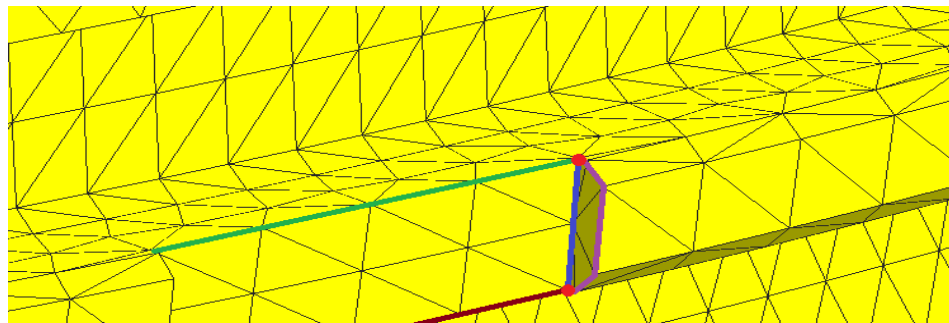


# Проверка характерных особенностей модели: Классификация узлов сетки

1. внутренний узел;
2. поверхностный узел;
3. топологический узел:
  - узел на характерной кривой;
  - топологическая вершина.



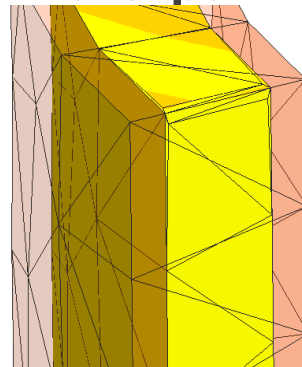
узлы на характерной кривой



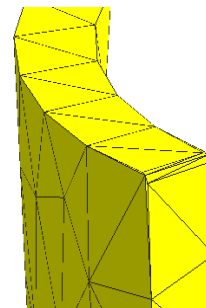
топологические вершины

# Проверка характерных особенностей модели: Потеря топологических связей в многогранной и поверхностной сетках

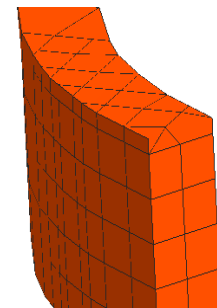
- составление карты топологических связей;
- вычисление количества характерных кривых для каждого многогранного узла;
- удаление из карты связей узлов, для которых количество топологических соседей не меньше количества характерных кривых, выходящих из этого узла;
- среди оставшихся узлов, выбираем те, которые лежат на характерных кривых, начинающихся и заканчивающихся топологическими вершинами;
- если по характерным кривым невозможно проложить путь, то в этом фрагменте сетки детектируется потеря топологии



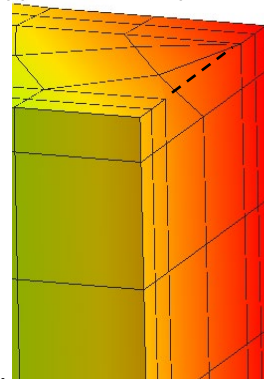
взаимное расположение  
исходной и смещенной сеток



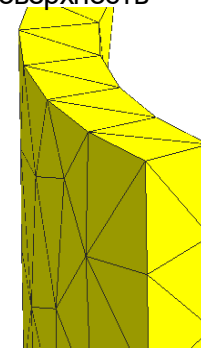
Фрагменты сеток до изменения  
смещенная  
поверхность



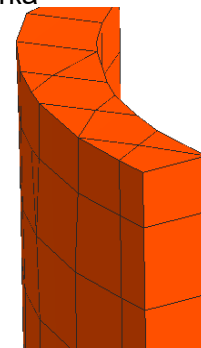
многогранная  
сетка



фрагмент модели после  
восстановления  
пограничного слоя



Фрагменты сеток после изменения  
смещенная  
поверхность

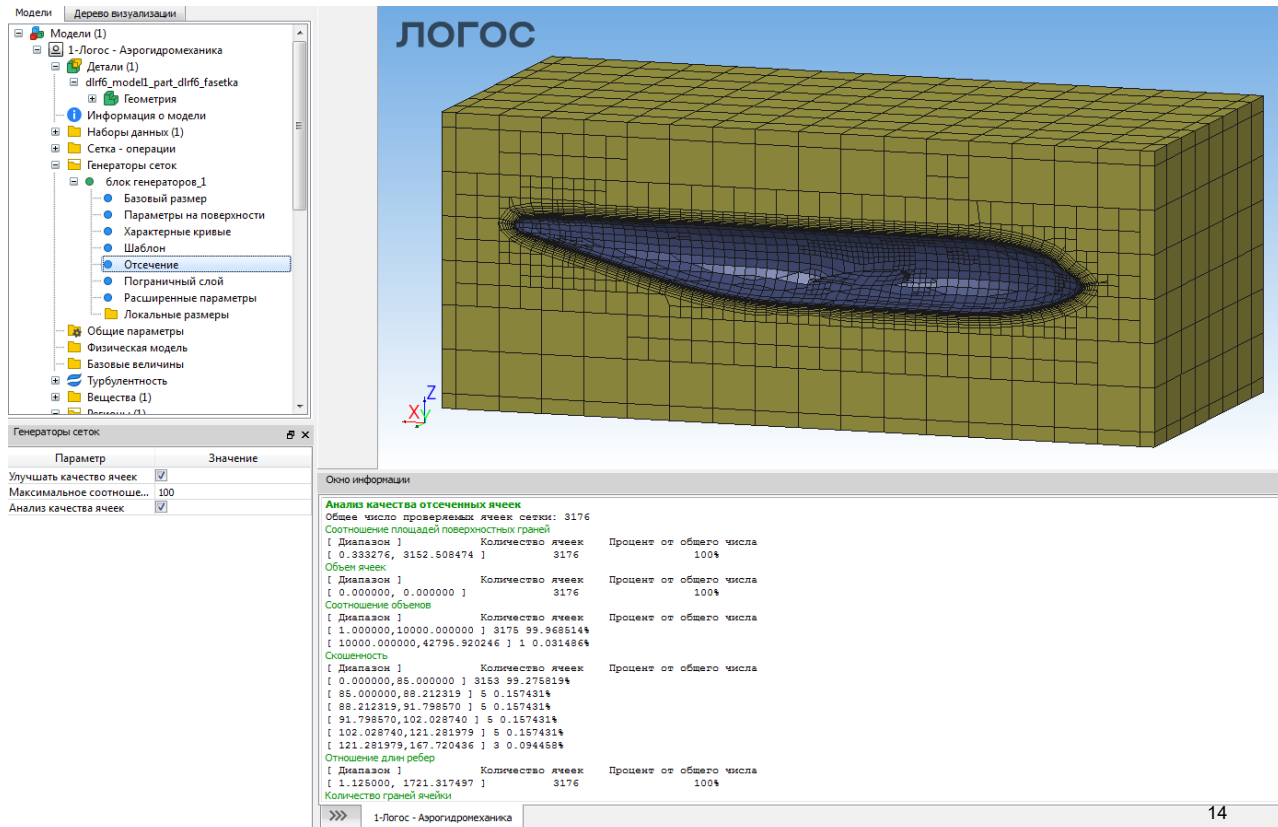


многогранная<sup>13</sup>  
сетка

# Функциональные возможности

В настоящее время реализованы следующие возможности:

- анализ качества отсеченных и/или ячеек пограничного слоя в процессе генерации сетки;
- анализ качества сеток после построения ячеек;
- сравнение качества сеток, построенных разными версиями генераторов.



**ЛОГОС**

Модели | Дерево визуализации

- Модели (1)
  - 1-Логос - Аэрогидромеханика
    - Детали (1)
      - dirf6\_model1\_part\_dirf6\_fasetka
        - Геометрия

Генераторы сеток

- блок генераторов\_1
  - Базовый размер
  - Параметры на поверхности
  - Характерные кривые
  - Шаблон
  - Отсечение**
  - Пограничный слой
  - Расширенные параметры
  - Локальные размеры

Общие параметры  
Физическая модель  
Базовые величины  
Турбулентность  
Вещества (1)  
Детали (1)

Параметр	Значение
Улучшать качество ячеек	<input checked="" type="checkbox"/>
Максимальное соотноше...	100
Анализ качества ячеек	<input checked="" type="checkbox"/>

Окно информации

**Анализ качества отсеченных ячеек**

Общее число проверенных ячеек сетки: 3176

Соотношение площадей поверхностных граней

Диапазон	Количество ячеек	Процент от общего числа
[ 0.333276, 3152.508474 ]	3176	100%

Объем ячеек

Диапазон	Количество ячеек	Процент от общего числа
[ 0.000000, 0.000000 ]	3176	100%

Соотношение объемов

Диапазон	Количество ячеек	Процент от общего числа
[ 1.000000, 10000.000000 ]	3175	99.968514%
[ 10000.000000, 42795.920246 ]	1	0.031486%

Скошенность

Диапазон	Количество ячеек	Процент от общего числа
[ 0.000000, 85.000000 ]	3153	99.275819%
[ 85.000000, 88.212319 ]	5	0.157431%
[ 88.212319, 91.798570 ]	5	0.157431%
[ 91.798570, 102.028740 ]	5	0.157431%
[ 102.028740, 121.281979 ]	5	0.157431%
[ 121.281979, 167.720436 ]	3	0.094458%

Отношение длин ребер

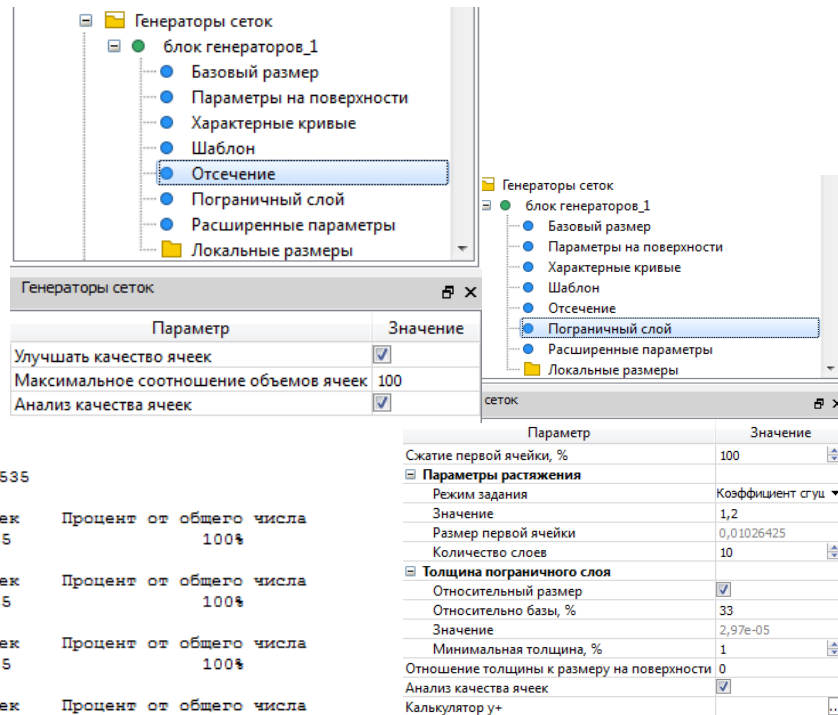
Диапазон	Количество ячеек	Процент от общего числа
[ 1.125000, 1721.317497 ]	3176	100%

Количество граней ячеек

1-Логос - Аэрогидромеханика

# Функциональные возможности: Анализ качества ячеек в процессе генерации сетки

- Соотношение площадей поверхностных граней
- Объем ячеек
- Соотношение объемов
- Скошенность
- Отношение длин ребер
- Количество граней ячейки



Параметр	Значение
Улучшать качество ячеек	<input checked="" type="checkbox"/>
Максимальное соотношение объемов ячеек	100
Анализ качества ячеек	<input checked="" type="checkbox"/>

Параметр	Значение
Сжатие первой ячейки, %	100
Параметры растяжения	
Режим задания	Коэффициент сгущ
Значение	1,2
Размер первой ячейки	0,01026425
Количество слоев	10
Толщина пограничного слоя	
Относительный размер	<input checked="" type="checkbox"/>
Относительно базы, %	33
Значение	2,97e-05
Минимальная толщина, %	1
Отношение толщины к размеру на поверхности	0
Анализ качества ячеек	<input checked="" type="checkbox"/>
Калькулятор y+	...

## Анализ качества отсеченных ячеек

Общее число проверяемых ячеек сетки: 3535

### Соотношение площадей поверхностных граней

[ Диапазон ]	Количество ячеек	Процент от общего числа
[ 0.250000, 4702.221896 ]	3535	100%

### Объем ячеек

[ Диапазон ]	Количество ячеек	Процент от общего числа
[ 0.000000, 0.000000 ]	3535	100%

### Соотношение объемов

[ Диапазон ]	Количество ячеек	Процент от общего числа
[ 1.000000, 2206.438257 ]	3535	100%

### Скошенность

[ Диапазон ]	Количество ячеек	Процент от общего числа
[ 0.000000, 85.000000 ]	3506	99.179632%
[ 85.000000, 87.575243 ]	7	0.198020%
[ 87.575243, 93.264245 ]	7	0.198020%
[ 93.264245, 113.647031 ]	7	0.198020%
[ 113.647031, 145.064010 ]	7	0.198020%
[ 145.064010, 150.172392 ]	1	0.028289%

# Функциональные возможности: Анализ качества сетки после построения ячеек

- диагностический файл
- файл в формате EFR

## CROSSING\_FACES

Number of cells with CROSSING\_FACES: 11

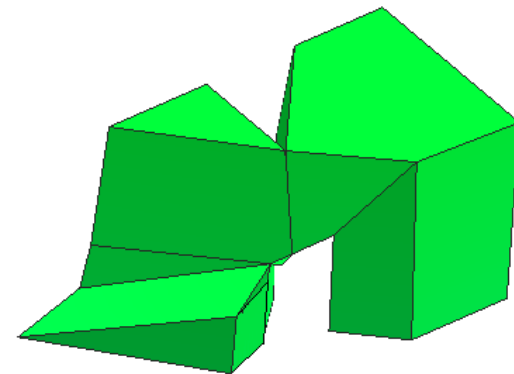
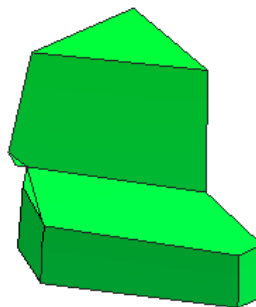
12688363 12688364 12688365 12688366 12688367 13742491 13742492 13742493 13742494 13812644

## SMALL CELLS

[ -6.64906e-06, 1e-21 ]	171	0.00108877 %
[ -1.98043e-06, -6.64906e-06 ]	171	0.00108877 %
[ -6.97928e-07, -1.98043e-06 ]	171	0.00108877 %
[ -8.52104e-11, -6.97928e-07 ]	171	0.00108877 %
[ 1e-21, 10459 ]	15705142	99.9956 %

## SMALL FACES

[ 2.77556e-17, 2.77556e-17 ]	2	1.27341e-05 %
[ 2.77556e-17, 1e-10 ]	2	1.27341e-05 %
[ 1.49541e-12, 2.77556e-17 ]	2	1.27341e-05 %
[ 2.85362e-11, 1.49541e-12 ]	2	1.27341e-05 %
[ 1e-10, 450 ]	15705818	99.9999 %



Выборка по невыпуклым ячейкам



# Функциональные возможности: Сравнение качества сеток, построенных разными версиями генераторов

Расчет текущей  
версией  
генератора

эталонный  
лог-файл

Расчет  
модифицированной  
версией генератора

сравнение  
качества

```
QUALITY
TIME_MESH_TOPOLOGY: 0
TIME_CALCULATE_OFFSET: 213.33
TIME_TEMPLATE: 87.55
TIME_CLIP: 178.18
TIME_PRISMATIC: 65.48
TIME_BUILD_MESH: 544.54
MEMORY_MESH_TOPOLOGY: -1
MEMORY_CALCULATE_OFFSET: 744
MEMORY_TEMPLATE: 1468
MEMORY_CLIP: 2707
MEMORY_PRISMATIC: 4087
MEMORY_BUILD_MESH: 3690
CORE_CELLS: 508872
CUT_CELLS: 346639
PRISM_CELLS: 4395927
COUNT_of_CHECKING_CELLS: 5251438
FREE_POINTS: 0
FREE_FACES: 0
FREE_EDGES: 0
CLOSED_CELLS: 0
CONCAVE_FACES: 549
"CONCAVE_FACES: 1028314 1028332 1028368 1028387
"CONCAVE_FACES_CCM: 43
"CONCAVE_FACES_CCM: 1028368 1028387 1028453 1028
CONCAVE_CELLS: 27246
"CONCAVE_CELLS: 3743 3786 3787 3824 3825 3862 38
CONCAVE_CELLS_CCM: 742
"CONCAVE_CELLS_CCM: 15128 59622 64045 69408 8015
FACE_NUMBER3: 0
SMALL_CELLS_COUNT: 0
Percent of bad cells: 0
Minimum value: 9.65482e-18
Maximum value: 0.064
SMALL_FACES_COUNT: 8042
Percent of bad cells: 0.153139
Minimum value: 1.32349e-23
Maximum value: 0.16
VOLUME_CHANGE_COUNT: 80
Percent of bad cells: 0.00152339
Minimum value: 1
Maximum value: 71364.4

COMPARE
TIME_MESH_TOPOLOGY: 0 -> 0
TIME_CALCULATE_OFFSET: 212.44 -> 213.33
TIME_TEMPLATE: 84.48 -> 87.55
TIME_CLIP: 173.51 -> 178.18
TIME_PRISMATIC: 66.42 -> 65.48
TIME_BUILD_MESH: 536.85 -> 544.54
MEMORY_MESH_TOPOLOGY: -1 -> -1
MEMORY_CALCULATE_OFFSET: 743 -> 744
MEMORY_TEMPLATE: 1468 -> 1468
MEMORY_CLIP: 2705 -> 2707
MEMORY_PRISMATIC: 4085 -> 4087
MEMORY_BUILD_MESH: 3688 -> 3690
CORE_CELLS: 508872 -> 508872
CUT_CELLS: 346639 -> 346639
PRISM_CELLS: 4395927 -> 4395927
FREE_POINTS: 0 -> 0
Criterion FREE_FACES: 0 -> 0
Criterion FREE_EDGES: 0 -> 0
Criterion CLOSED_CELLS: 0 -> 0
Criterion CONCAVE_FACES: 549 -> 529
Criterion CONCAVE_FACES_CCM: 43 -> 3
Criterion CONCAVE_CELLS: 7246 -> 4246
Criterion CONCAVE_CELLS_CCM: 742 -> 352
Criterion FACE_NUMBER3: 0 -> 0
Criterion SMALL_FACES: 8042 ( 0.153139%) -> 2041 ( 0.043139%)
Criterion SMALL_CELLS: 0 ( 0%) -> 0 ( 0%)
```

# Результаты

**Реализованы методы анализа качества многогранных ячеек, которые включают в себя:**

- более 40 критериев качества;
- анализ качества отсеченных и/или ячеек пограничного слоя в процессе генерации сетки;
- анализ качества сеток после построения ячеек;
- сравнение качества сеток, построенных разными версиями генераторов.

# Спасибо за внимание

**Кузьменко Милана Владимировна**  
Научный сотрудник

Тел.: 8 (831) 302 75 50  
E-mail: [mvkuzmenko@vniief.ru](mailto:mvkuzmenko@vniief.ru)  
[www.rosatom.ru](http://www.rosatom.ru)

**01.06.2023**

