



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Возможности построения поверхностных сеток в рамках подготовки расчетных моделей при решении задач аэро- и гидродинамики в пакете программ Логос

XVI международная конференция

«Забабахинские научные чтения»

22-26 мая 2023 г.

Снежинск, Челябинская область, Россия

Е.О. Евстифеева, О.Н. Борисенко, Д.М. Панкратов,
Т.В. Цалко, А.И. Шавхитдинова

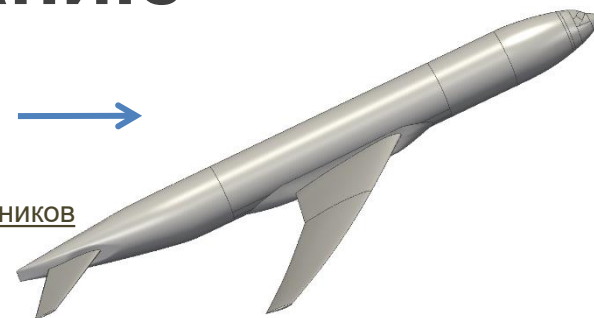
Подготовка задачи к численному моделированию



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

1. Загрузка исходной геометрической модели

- Модель, заданная параметрически [1] →
Форматы: .igs, .step
- Модель, описанная набором треугольников
Формат: .stl



2. Препроцессор

Построение поверхностной сетки

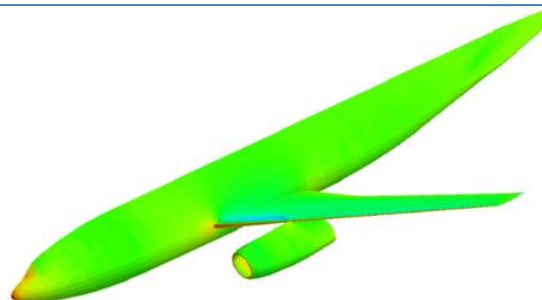
Построение расчетной сетки



3. Моделирование физических процессов течения жидкости и газа

- Уравнения Эйлера (невязкая среда)
- Уравнения Навье-Стокса (вязкая среда)

4. Постпроцессор

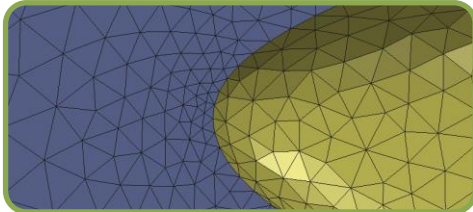


[1] О. Н. Борисенко, А. Н. Лукичев, Е. О. Евстифеева, Д. М. Панкратов, Т. В. Цалко, А. Г. Гиниятуллина, Алгоритмы обработки особенностей геометрических моделей при построении поверхностных треугольных сеток в препроцессоре пакета программ "ЛОГОС", Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов 2020. Вып.3. С. 40-52.

Генераторы сеток при решении задач аэро- и гидродинамики

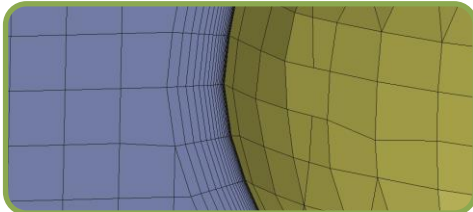


Генерация поверхностных треугольных сеток

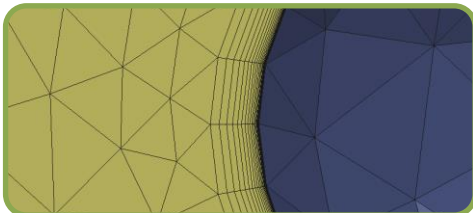


- Методом подвижного фронта
- Перестроением в 3D

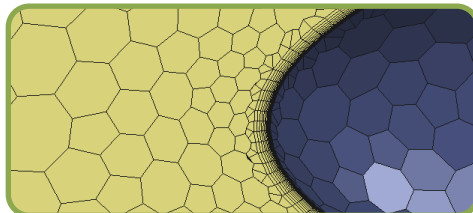
Генерация расчетных сеток



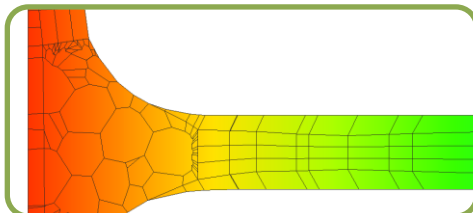
Из многогранников методом отсечения



Из тетраэдров методом подвижного фронта



Из многогранников преобразованием тетраэдров



Из многогранников с выделением «тонких» зон

Требования к генератору поверхностных сеток



РФАЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

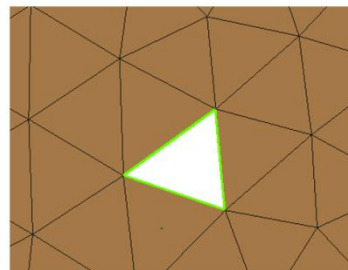
Требования	Чем мотивировано
1. Отсутствие критичных ошибок	Наличие критичных ошибок прерывает генерацию расчетной сетки.
2. Допустимое качество ячеек	Качество ячеек на поверхности влияет на качество объемных ячеек и на успешность этапов генерации расчетной сетки.
3. Соответствие размеров ячеек кривизне и заданным значениям	Задание размеров производится инженером для формирования нужной детализации сетки: более точное описание сетки интересующих его зон и более грубое описание остальной области.
4. Обработка конструктивных особенностей	Определенные зоны сетки требуют дополнительной обработки для возможности формирования объемных ячеек нужного типа и высокого качества.
5. Допустимая скорость построения	Увеличение количества моделей высокой детализации повышает требования к сокращению времени генерации сетки.

Ошибки поверхностной сетки

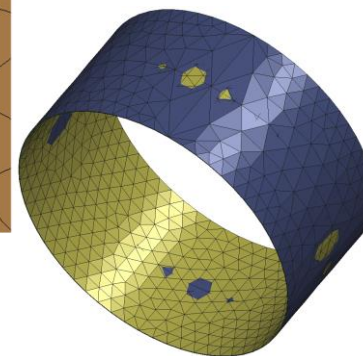


Критичные ошибки:

- 1) «открытые» ребра;
- 2) пересечения;
- 3) вырожденные треугольники



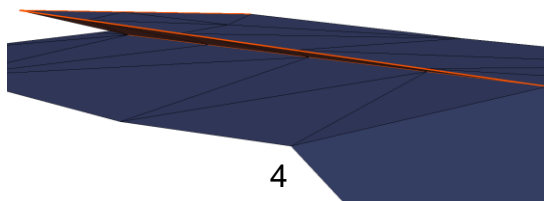
1



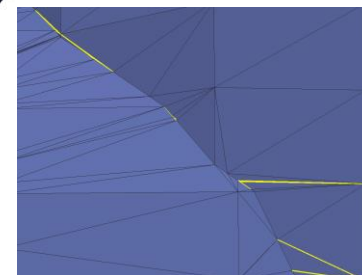
2

Другие ошибки:

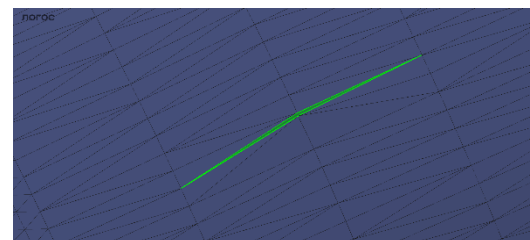
- 4) подгибы;
- 5) треугольники низкого качества
- 6) «многолистность»



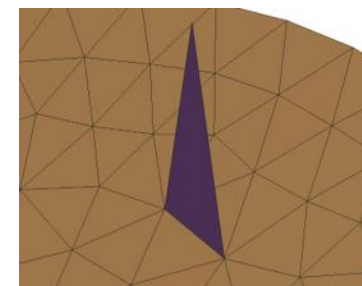
4



3



5



6

Возможность исправления доступна автоматически в ходе генерации сетки и в интерактивном режиме через интерфейс.

Автоматическое исправление пересечений



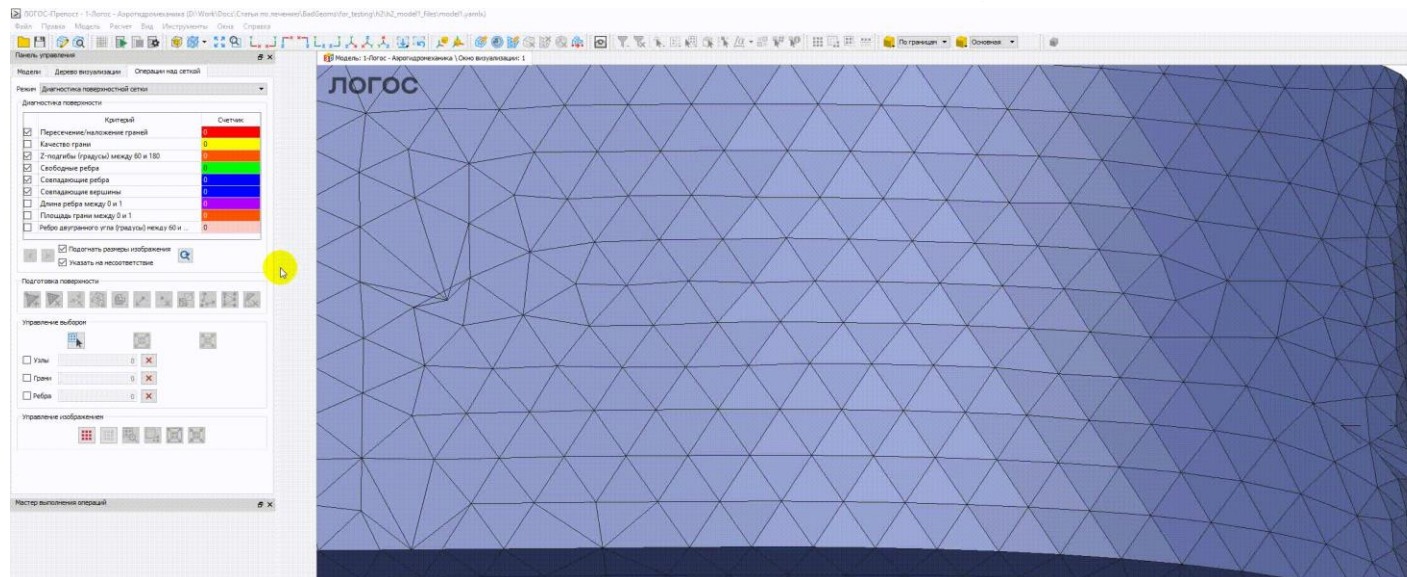
РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Возможность использования

до построения для
моделей в фасеточном
представлении
(интерактивно)

в ходе построения
(активация параметра)

после построения
(интерактивно)



Пример интерактивного запуска автоматического исправления пересечений

Автоматическое затягивание отверстий



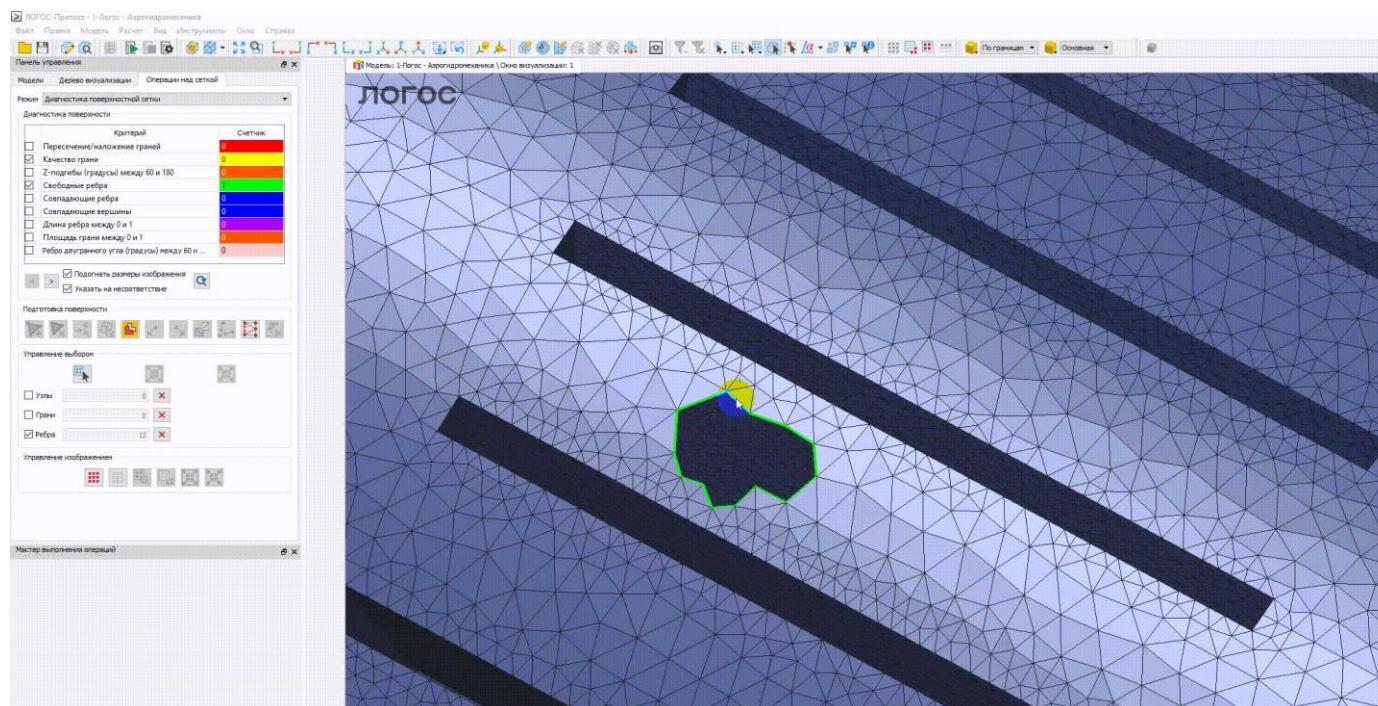
РФАЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Возможность использования

до построения для
моделей в фасеточном
представлении
(интерактивно)

в ходе построения
(активация параметра)

после построения
(интерактивно)



Пример интерактивного запуска автоматического затягивания отверстий

Удаление вырожденных элементов



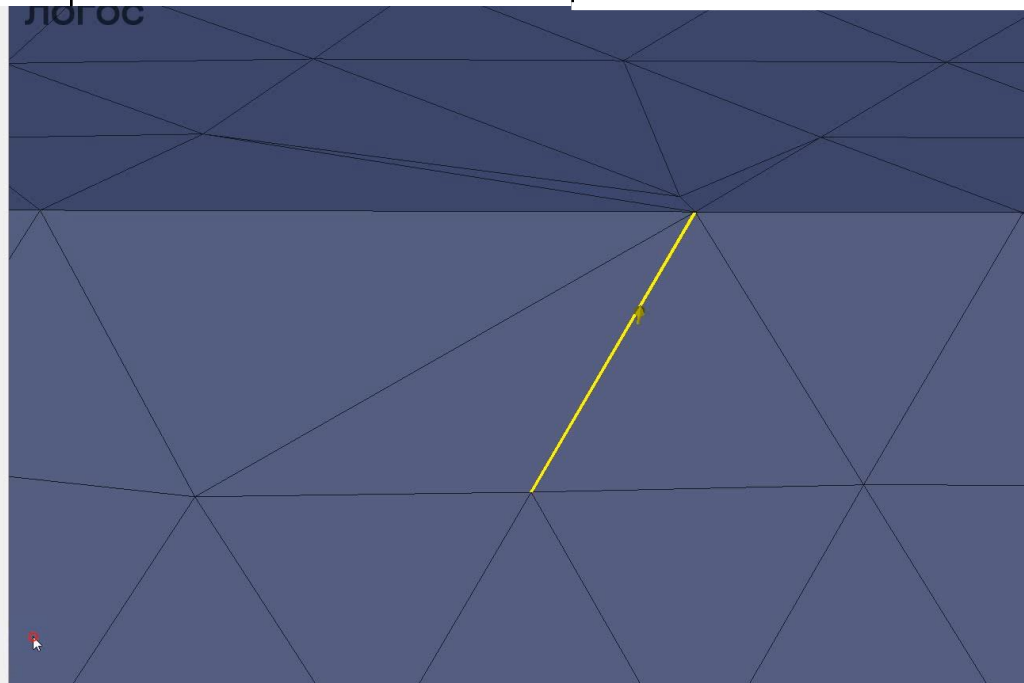
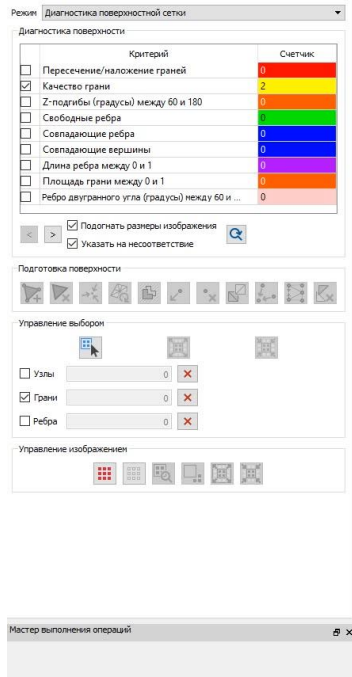
РФАЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Возможность использования

до построения для
моделей в фасеточном
представлении
(интерактивно)

в ходе построения

после построения
(интерактивно)



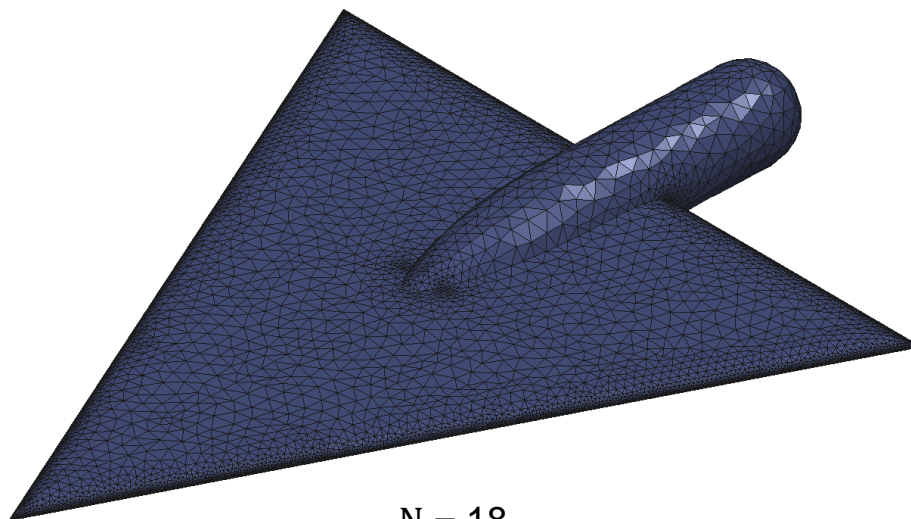
Пример интерактивного запуска локального перестроения выделенной области с вырожденными треугольниками

Вычисление размеров ячеек с учетом кривизны поверхности

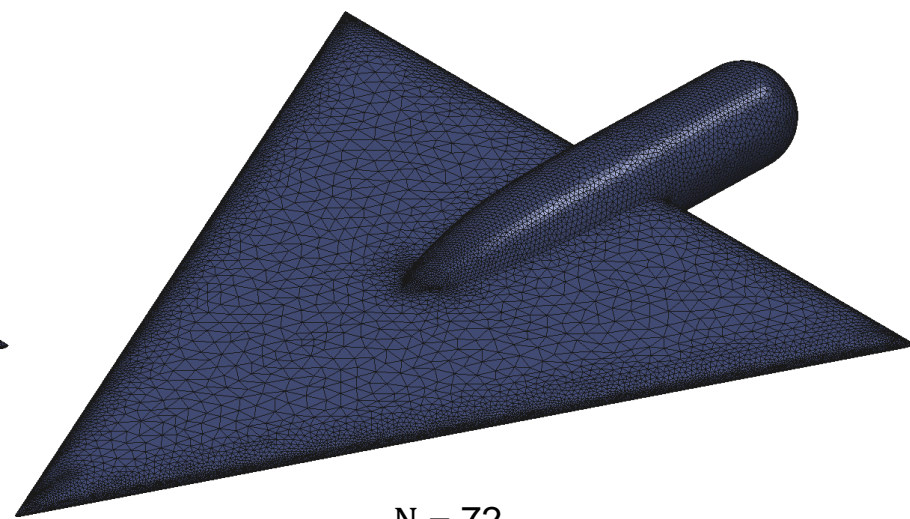


Формула вычисления желаемого размера

$$s = \frac{1}{k} \sqrt{2 - 2 * \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right)}, \text{ где } N - \text{ количество точек на окружности,} \\ k - \text{ значение кривизны [1].}$$



N = 18



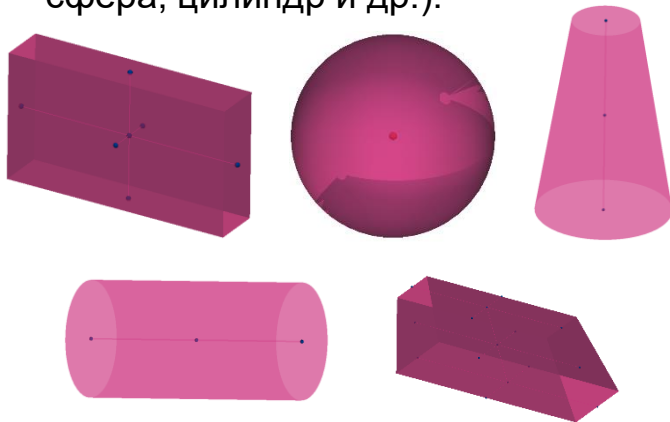
N = 72

Адаптация ячеек в контрольной области



Варианты задания областей для адаптивного измельчения ячеек:

1. Простые геометрические тела (конус, сфера, цилиндр и др.).



2. Замкнутая фигура произвольной формы (загруженная в формате .stl).



Фрагмент исходной модели с заданной контрольной областью в виде цилиндра



Фрагмент сетки после построения со сжатием в выделенной области

Построение сетки стандартным способом



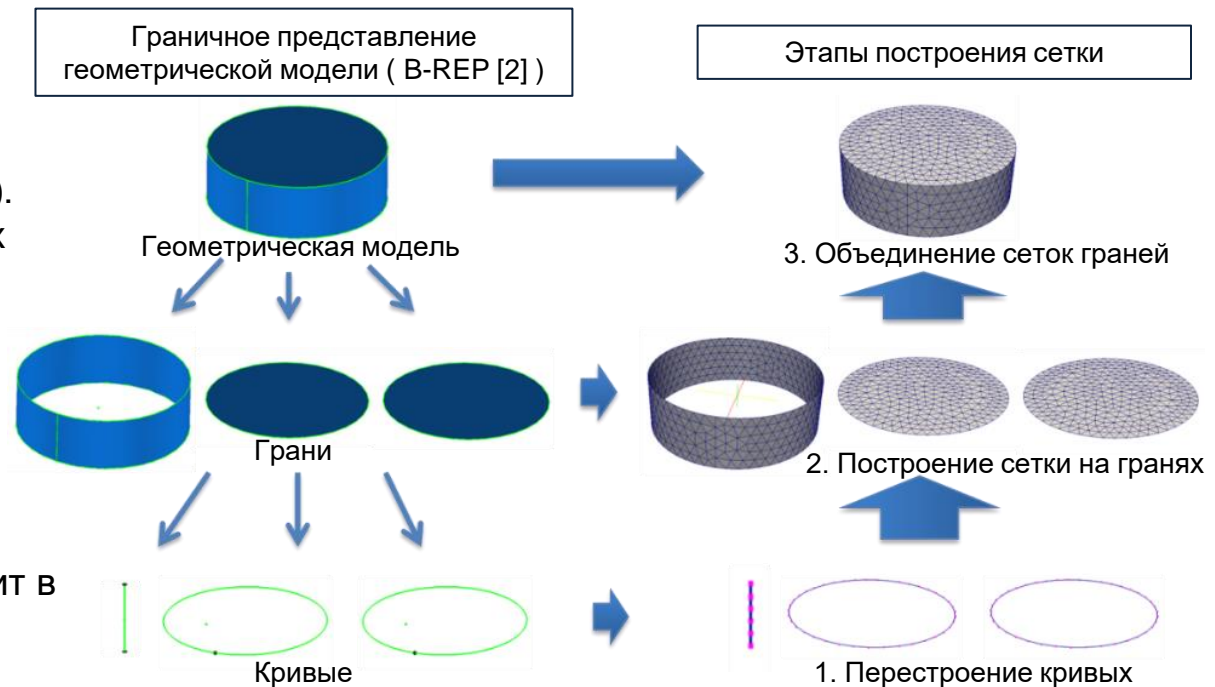
Суть подхода

Основные этапы [1]:

1. Перестроение кривых между гранями (границами).
2. Построение сетки на гранях (границах).
3. Объединение сеток граней.
4. Оптимизация сетки.

Особенности:

- Построение сетки происходит в пространстве 2D методом подвижного фронта,
- далее полученная сетка переносится в пространство 3D с помощью заданной функции отображения.



[1] Лукичев А.Н., Цалко Т.В., Панкратов Д.М., Логинов Д.В., Белова А.И., Моськина Е.О. Особенности построения триангуляционных сеток на поверхностях в аналитическом и фасеточном представлении / 15-ая научно-техническая конференция «Молодежь в науке» // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 73-78.

[2] B-REP (Boundary Representation) – граничное представление геометрического тела.

Перестроение моделей высокой детализации

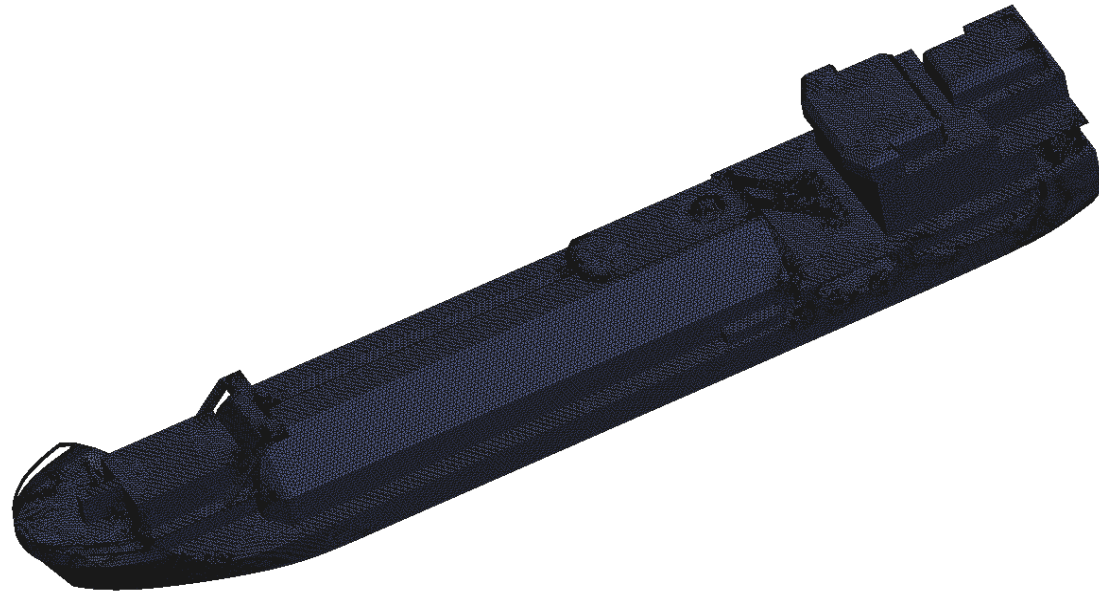


Суть подхода

Основные этапы [1] :

1. Вычисление и сглаживание метрик.
2. Упрощение сетки.
3. Оптимизация построенной сетки.

- Построение сетки происходит в пространстве 3D путем итерационного сокращения ячеек без переноса сетки в пространство 2D;
- ускорение подготовки моделей высокой детализации;
- высокое качество результирующей сетки.



Выбор оптимального по скорости подхода к построению сетки



Алгоритм анализа исходной модели [1]

1. В каждой вершине модели вычисляется метрика, зависящая от искривления исследуемой поверхности, по формуле:

$$s = \frac{1}{k} \sqrt{2 - 2 * \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right)}$$

где s – значение метрики,

k – вычисленное значение кривизны [9] в точке,

N – параметр разбиения окружности на N равных частей.

2. Для каждого ребра вычисляется желаемая длина по формуле:

$$l_i = \frac{s_1 + s_2}{2}$$

где S_1, S_2 – метрики по кривизне, вычисленные в вершинах ребра

3. Для каждого ребра всех треугольников сетки происходит оценка желаемой метрики с реальной длиной ребра.
4. Если у всех ребер треугольника реальная длина меньше желаемой, то ему в соответствие ставится подход к перестроению детализированных моделей, иначе – стандартный подход.

Тестовая модель	N, тыс.	t, сек.	
		Подход 1	Подход 2
Модель1	170,3	330	980
Модель2	830,8	611	198
Модель3	16,382	227	253

N – количество треугольников в исходной тестовой модели;

t – время генерации сетки;

Подход 1 – стандартный подход к построению;

Подход 2 – подход к перестроению моделей высокой детализации;

Зеленым цветом выделен выбранный подход к генерации сетки для тестовой модели.

Адаптация алгоритма вычисления кривизны для использования при построении объемных ячеек



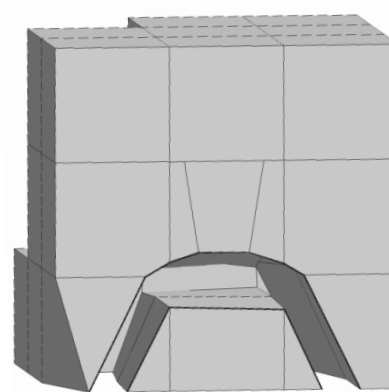
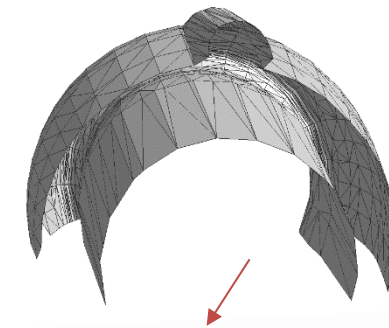
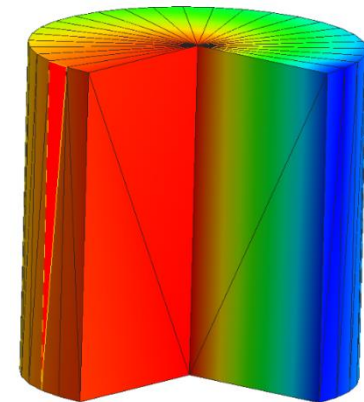
Проблема:

Если геометрическая модель в зоне высокой кривизны поверхности представлена треугольниками крупных размеров, то построенные на их основе объемные ячейки могут недостаточно аппроксимировать поверхности, что негативно влияет на качество расчета задачи в целом.

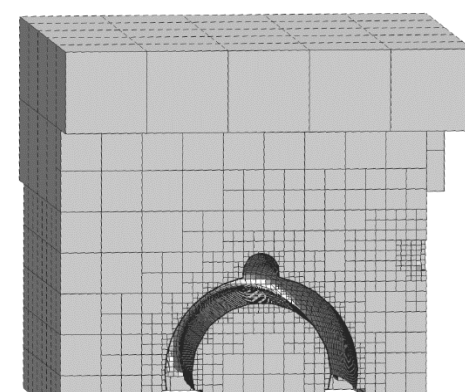
Решение:

Адаптация используемого в модуле генерации поверхностных сеток алгоритма вычисления кривизны для получения «весов» треугольников, применяемых для оценки размеров ячеек объемной сетки.

Примеры поверхностных сеток с крупными ячейками



Объемная сетка, построенная без учета кривизны



Объемная сетка, построенная с учетом кривизны

Влияние поверхностной сетки на построение смещенной поверхности

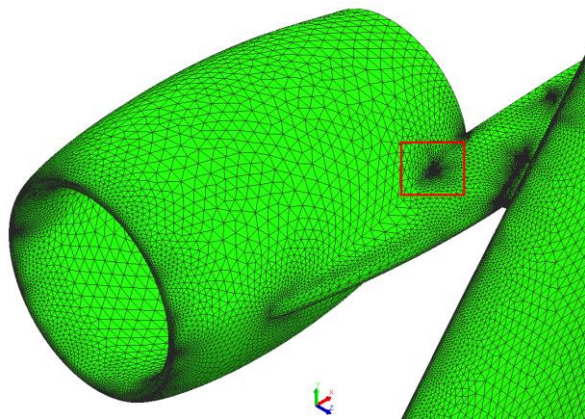


РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

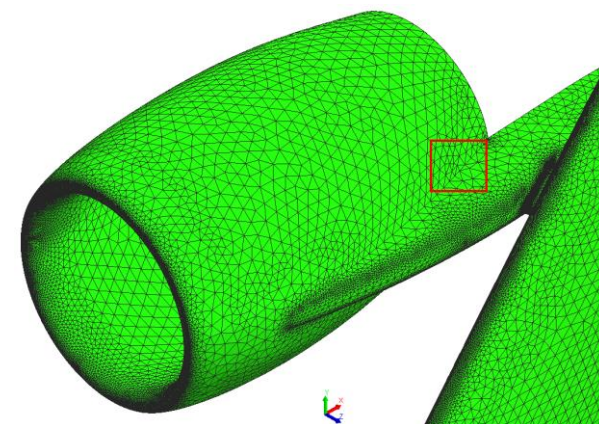
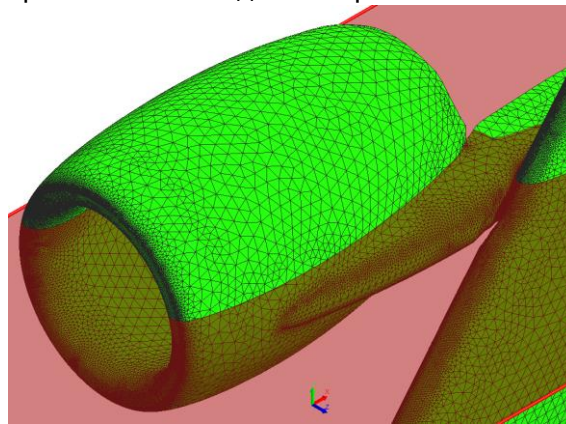
Для построения корректной смещенной поверхности в поверхностной сетке нежелательными являются:

- Неточные стыки двух гладких поверхностей (выступы или наложения).
- «Сгущения» треугольников на гладких поверхностях.
- «Дребезг» треугольников.

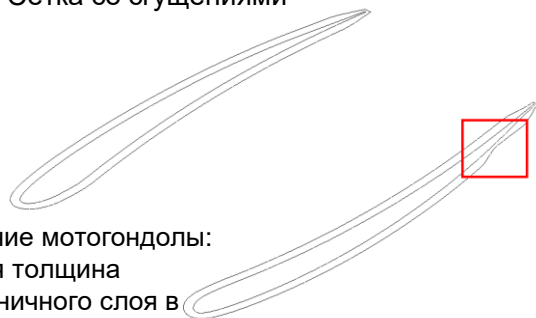
Построение сечения для поверхностной и смещенной сеток



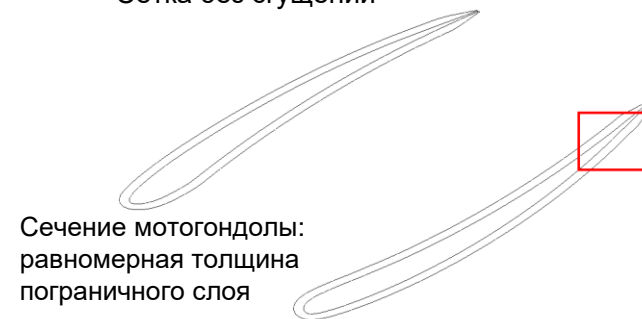
Сетка со сгущениями



Сетка без сгущений



Сечение мотогондолы:
малая толщина
пограничного слоя в
зоне сгущения

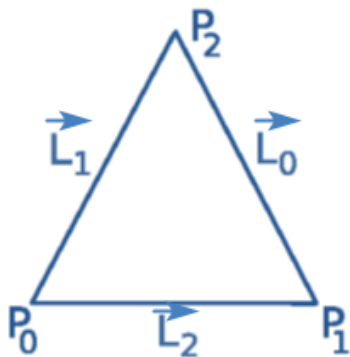


Сечение мотогондолы:
равномерная толщина
пограничного слоя

Критерии оценки качества треугольника



- По форме: $q_s = \frac{2A\sqrt{3}}{\vec{L}_2\vec{L}_2 + \vec{L}_1\vec{L}_1 - \vec{L}_2\vec{L}_1}$
- По соотношению сторон: $q_l = \frac{4A\sqrt{3}}{L_{max}(L_0 + L_1 + L_2)}$
- По соотношению радиусов вписанной и описанной окружности: $q_r = \frac{2r}{R}$



$$\vec{L}_0 = \vec{P}_2 - \vec{P}_1$$

$$\vec{L}_1 = \vec{P}_0 - \vec{P}_2$$

$$\vec{L}_2 = \vec{P}_1 - \vec{P}_0$$

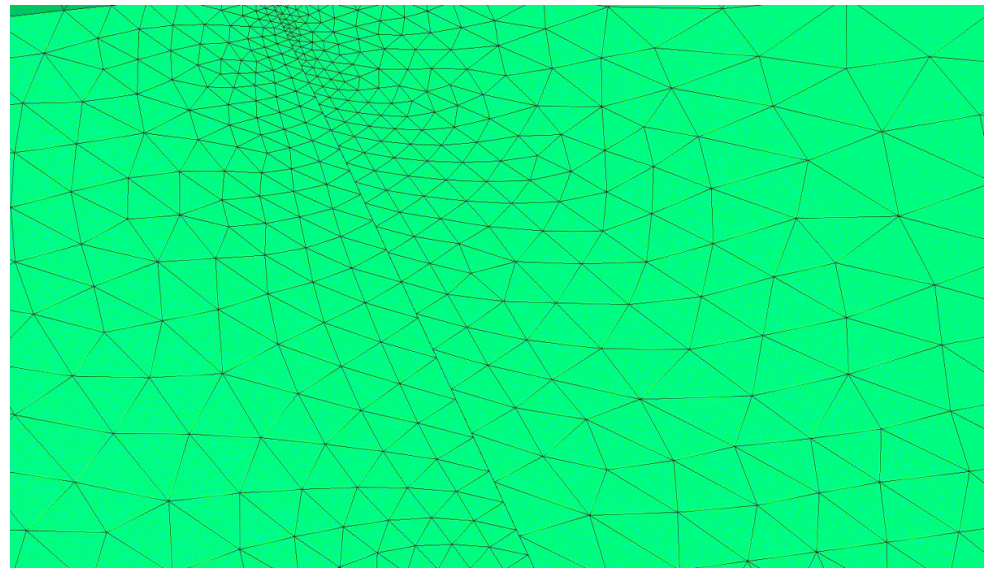
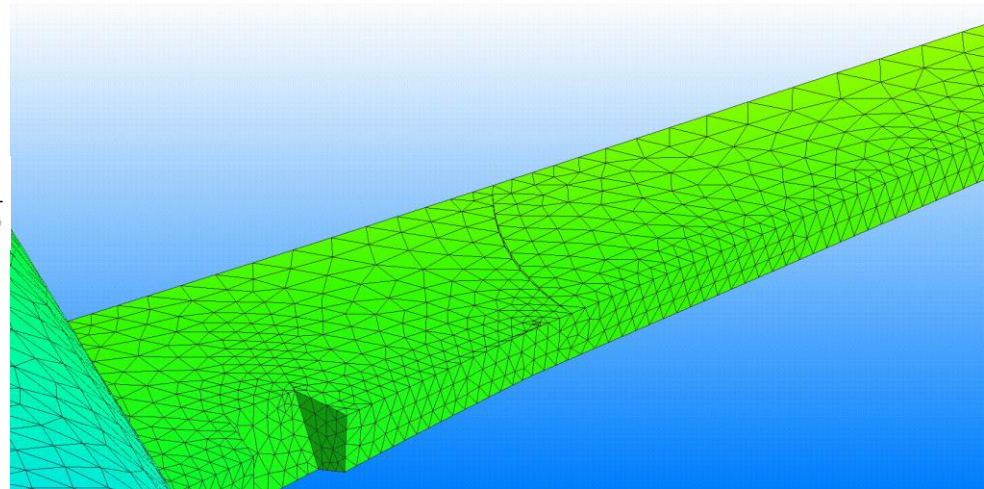
$$L_i = \|\vec{L}_i\|$$

$$L_{max} = \max(L_0, L_1, L_2)$$

A - площадь треугольника

$$0.0 \leq q \leq 1.0$$

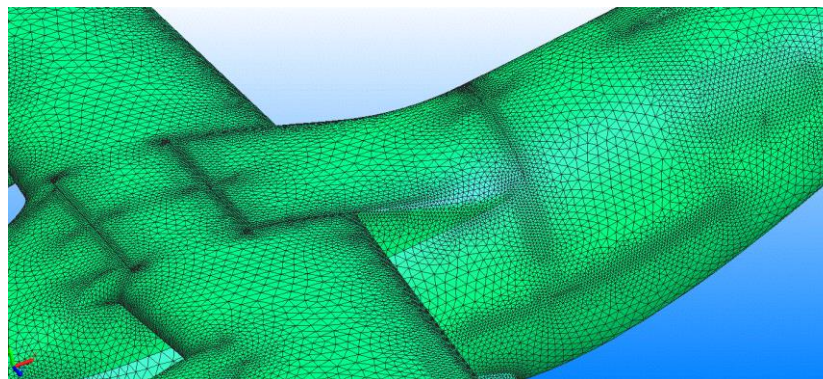
! Треугольники низкого качества ($q < \varepsilon_q$) порождают объемные ячейки низкого качества, что негативно сказывается на расчете.



Локальное перестроение областей



Локальное перестроение [1]
областей из треугольников



несоответствующего размера

$$L_i < k_{\min} \cdot h_{\min}$$
$$L_i > k_{\max} \cdot h_{\max} \quad i = \overline{1,3}$$

k_{\min}, k_{\max} - коэффициенты отклонения размеров

h_{\min}, h_{\max} - минимальный и целевой размеры,
заданные пользователем

с качеством, ниже порогового

$$q_{\min} = \min\{q_s, q_l, q_r\}$$
$$q_{\min} < \varepsilon_q$$

с большой разницей площадей у
смежных треугольников

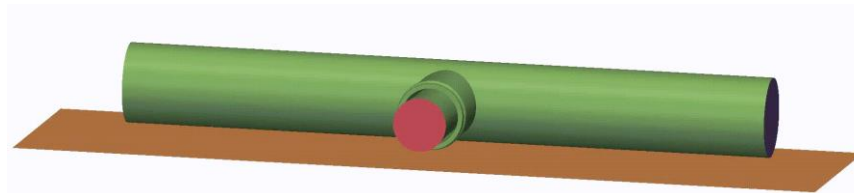
$$\frac{A_{\min}}{A_{\max}} < \varepsilon_a, \quad A_{\min} = \min\{A_i, A_j\}$$
$$A_{\max} = \max\{A_i, A_j\}$$

A_i, A_j - пара смежных треугольников

Учёт близости поверхностей

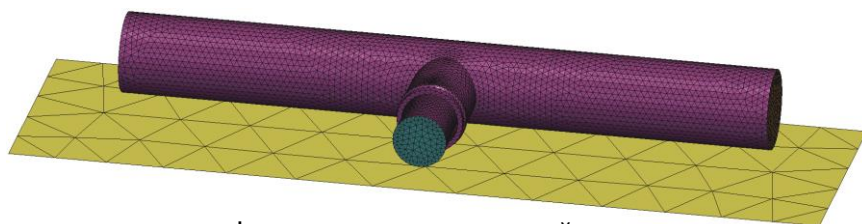


РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ



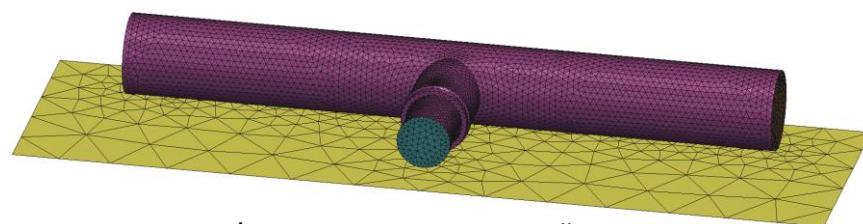
Фрагмент исходной модели с близкими поверхностями

Без учёта близости

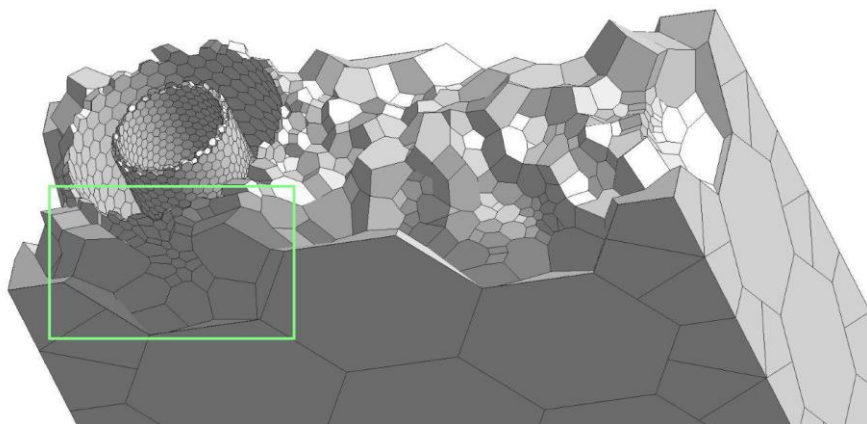


Фрагмент поверхностной сетки

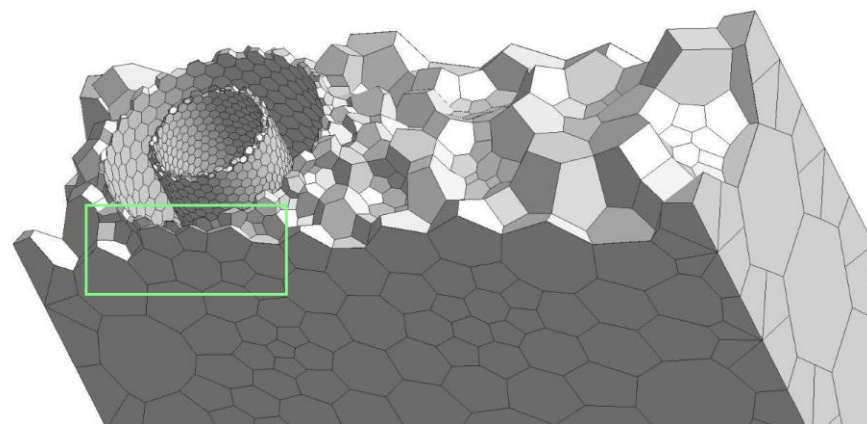
С учётом близости



Фрагмент поверхностной сетки



Фрагмент расчетной сетки из многогранников



Фрагмент расчетной сетки из многогранников

Обработка сетки на близких поверхностях тонкостенных конструкций



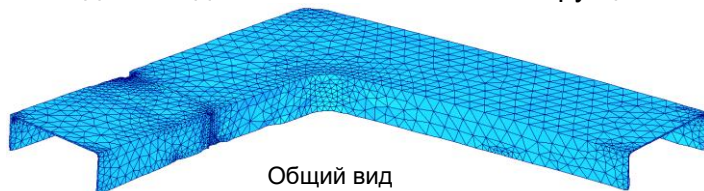
РФАЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

В «тонких» зонах объемная сетка формируется из призматических ячеек, полученных методом протягивания.

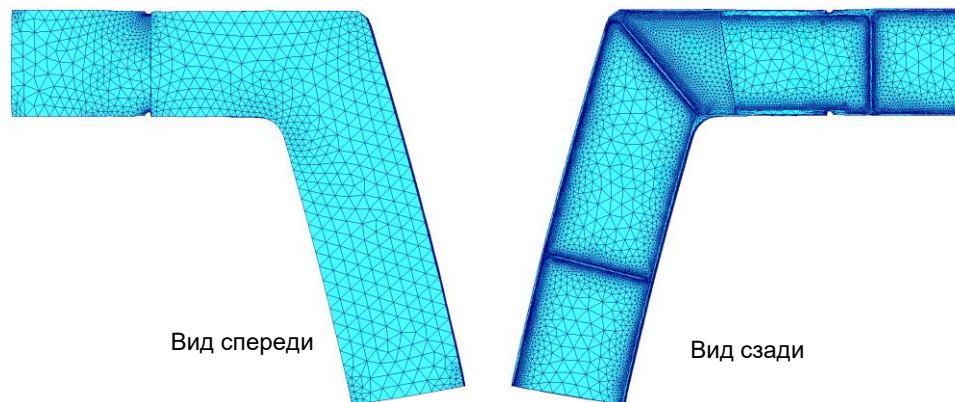
Для формирования призматического слоя необходимо дополнительная обработка поверхностной сетки - отображение (перенос) треугольников на близких поверхностях.

В результате переноса сетки для каждого треугольника будет получено однозначное ему соответствие на близкой поверхности.

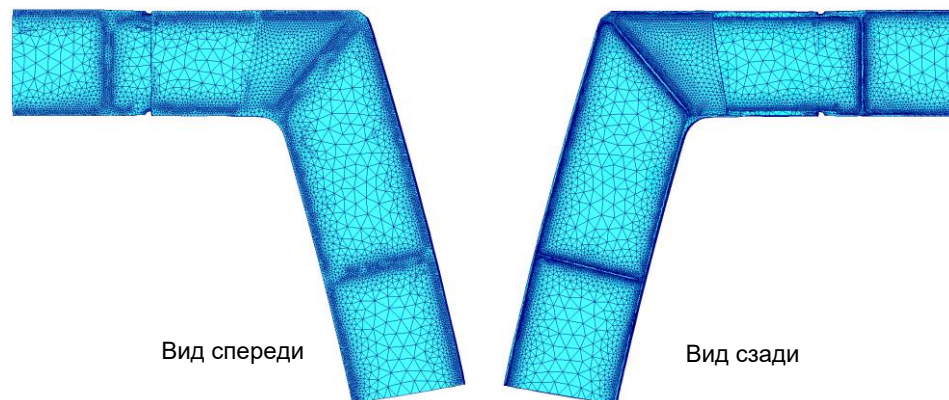
Исходная модель с тонкостенной конструкцией



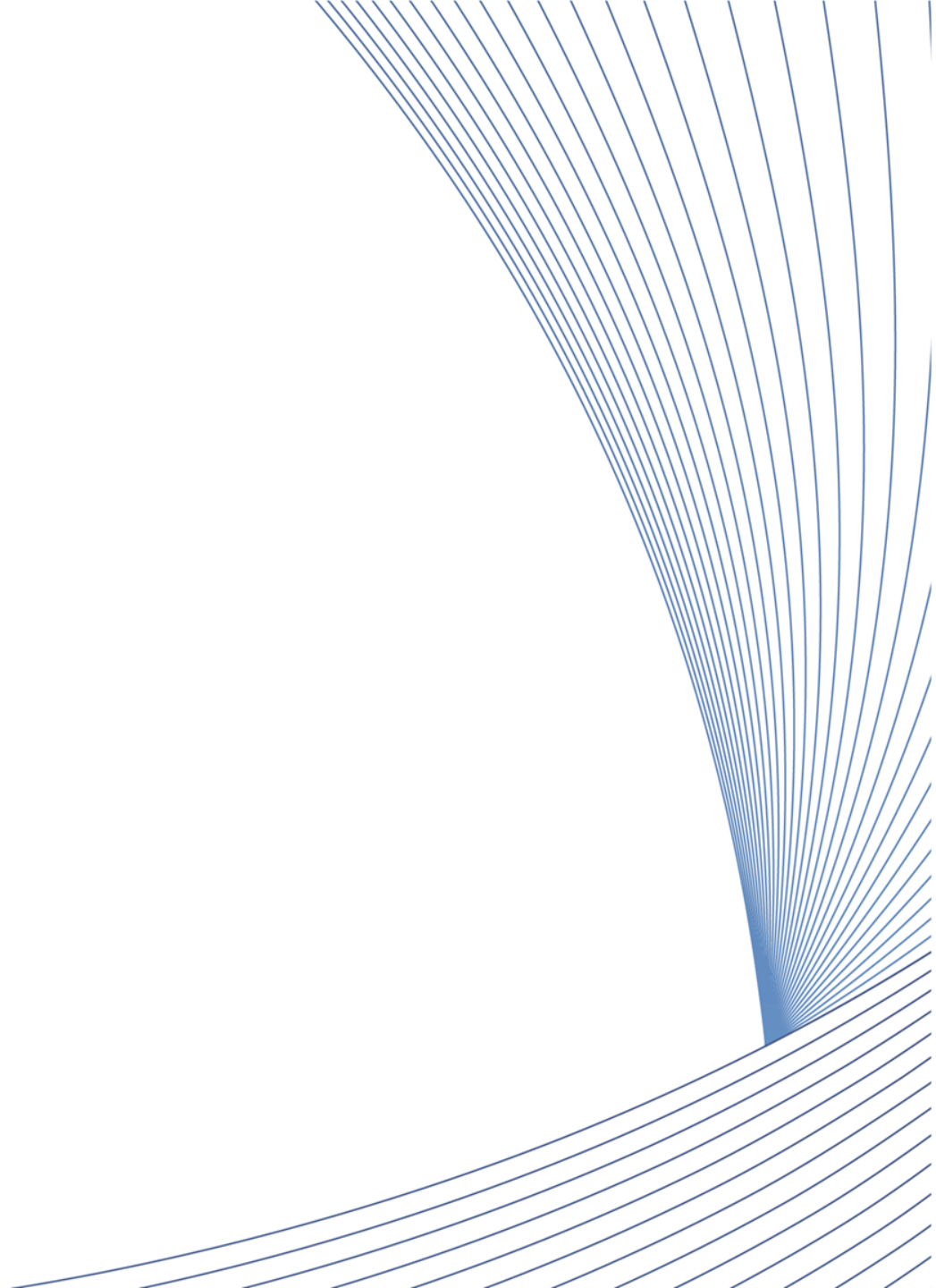
Поверхностная сетка до отображения



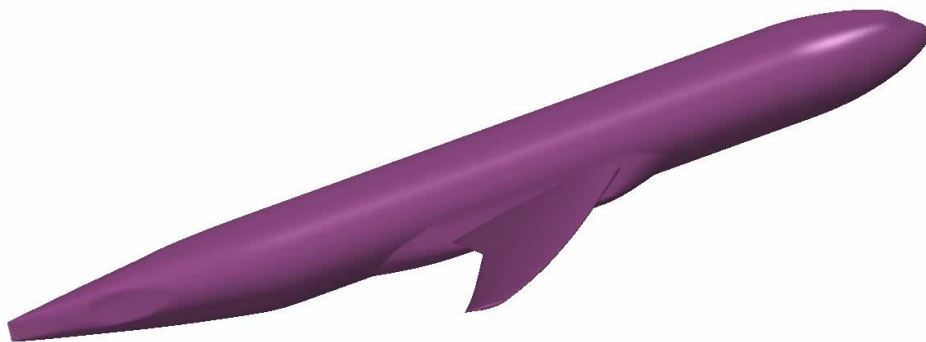
Поверхностная сетка после отображения



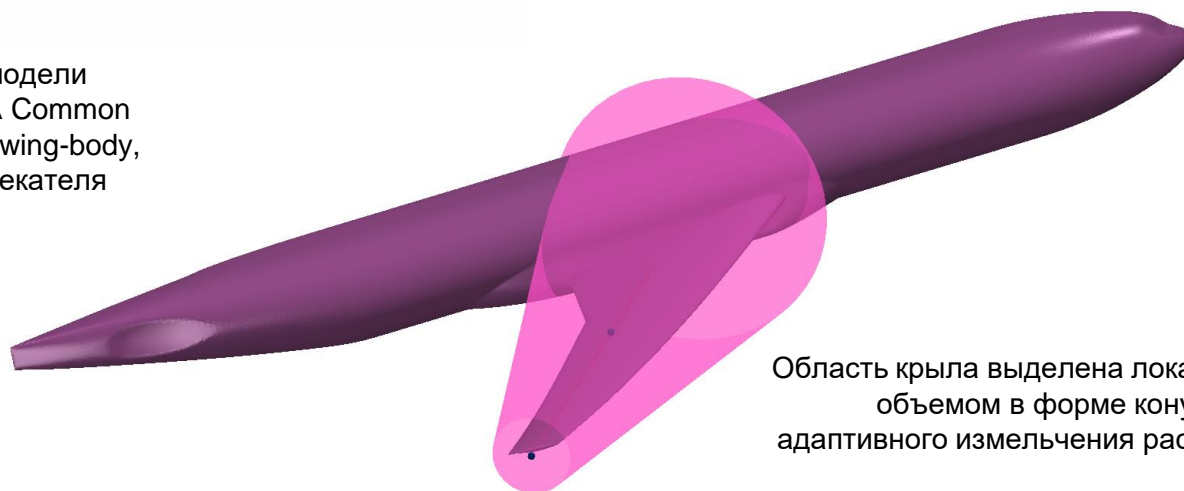
Результаты



Тестовая модель DPW5



В качестве базовой геометрической модели используется модель самолета NASA Common Research Model (CRM) конфигурации wing-body, состоящей из фюзеляжа, крыла и обтекателя места крепления крыла к фюзеляжу.

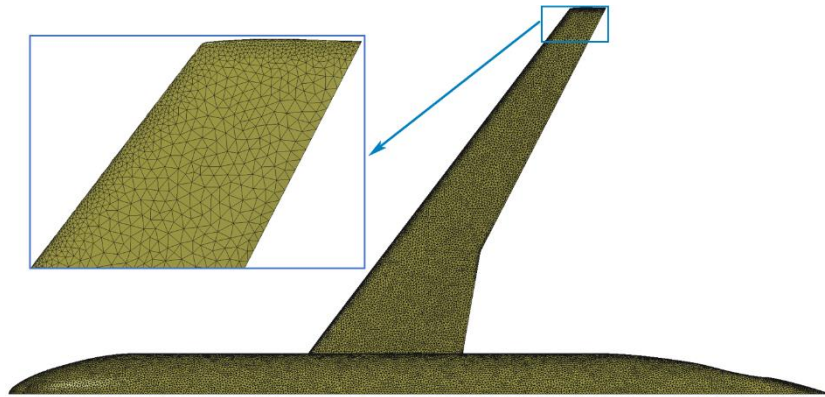


Область крыла выделена локальным объемом в форме конуса для адаптивного измельчения расчетной сетки

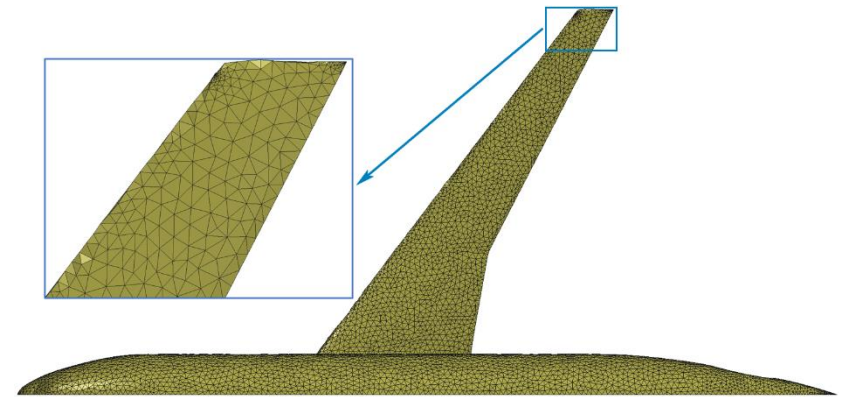
Поверхностные сетки для модели DPW5



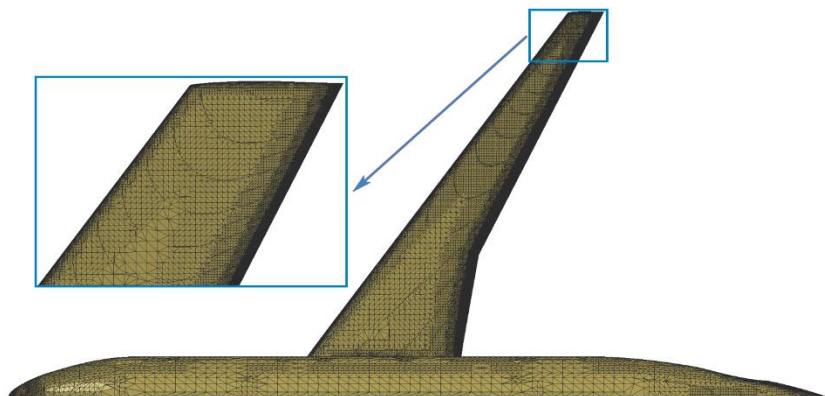
РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ



1. Поверхностная сетка, хорошо аппроксимирующая геометрическую модель



2. Более грубая поверхностная сетка



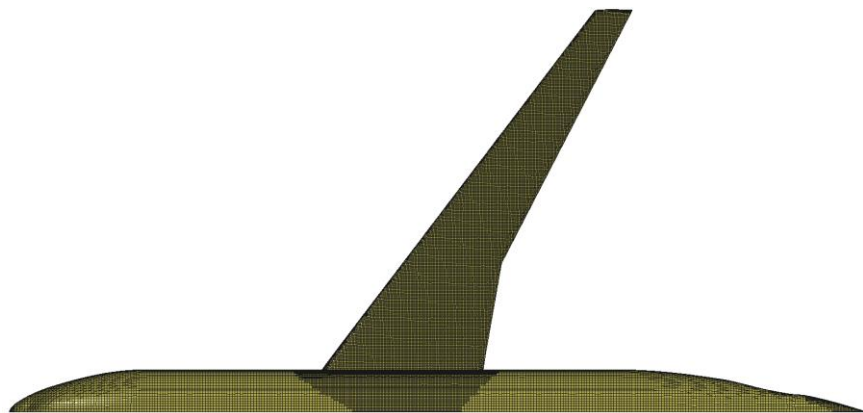
3. Сетка, подготовленная с помощью генератора замкнутой оболочки [1], без перестроения генератором

Модель	Количество ячеек в поверхностной сетке	Время генерации
Сетка 1	72 тыс.	0.8 мин.
Сетка 2	20 тыс.	0.7 мин.
Сетка 3	640 тыс.	-

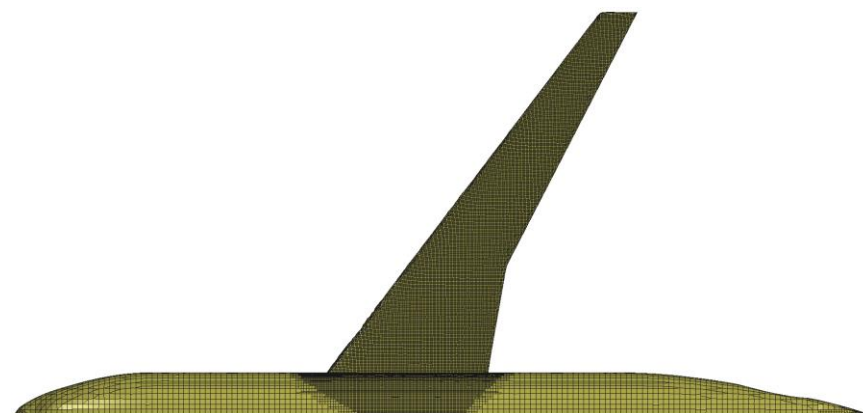
Расчетные сетки для модели DPW5



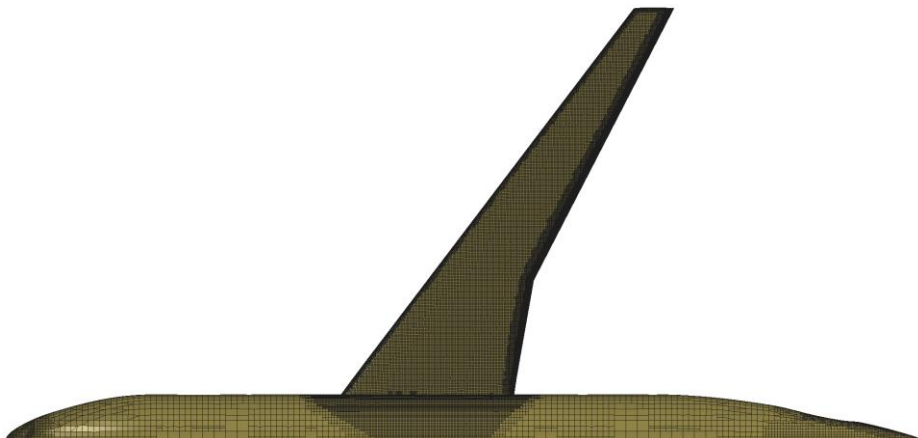
РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ



1. Расчетная сетка, построенная по поверхностной сетке 1



2. Расчетная сетка, построенная по поверхностной сетке 2



3. Расчетная сетка, построенная по поверхностной сетке 3

Модель	Количество ячеек в расчетной сетке	Время генерации
Сетка 1	4 млн.	1.4 мин.
Сетка 2	3.7 млн.	1.7 мин.
Сетка 3	10.5 млн.	7 мин.

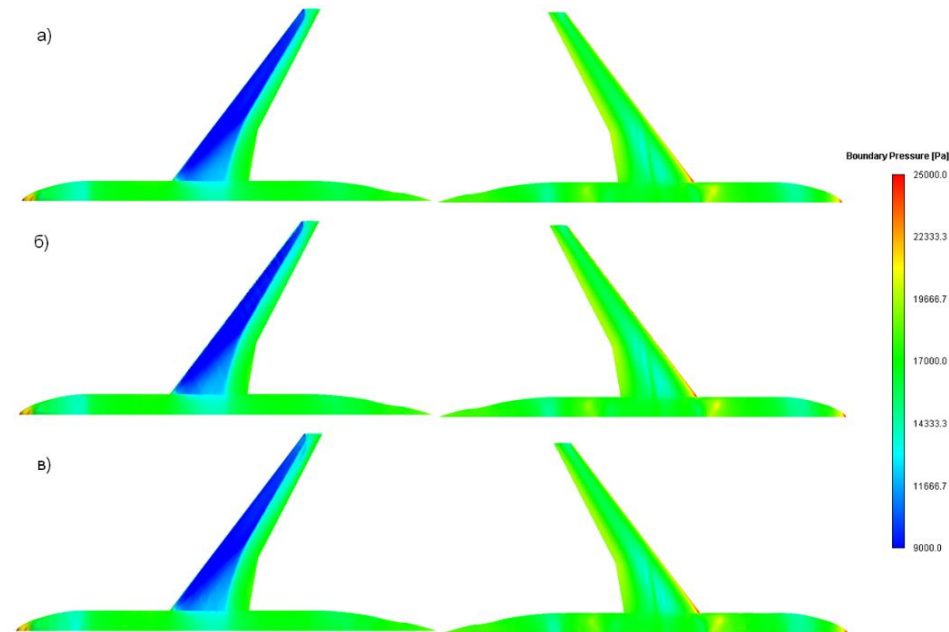
Характеристики расчета



Проведено трансзвуковое обтекание модели самолета DPW-5 при угле атаки равном 2.66 градуса. Для численного эксперимента использовалась RANS модель SA.

Для анализа правильности результатов оценивались аэродинамические характеристики самолета.

Экспериментальные данные широко обсуждаются в работе [1].



Распределение давления на поверхности самолета на наветренной (слева) и подветренной (справа) стороне

Модель	Коэффициент подъемной силы	Отклонение от эксперимента (%)
Эксперимент	0,4847	-
Сетка 1	0,475288	1,94
Сетка 2	0,459761	5,15
Сетка 3	0,445213	8,15

Табл.1. Зависимость коэффициента подъемной силы от расчетной сетки

Заключение



- ✓ Представлены возможности построения поверхностных сеток, реализованные в препроцессоре пакета программ «Логос».
- ✓ Построение поверхностных и расчетных сеток проводится для промышленных конструкций сложной конфигурации с выделением особенностей моделируемых процессов.
- ✓ Возможности по исправлению ошибок сетки позволяют проводить сквозное построение поверхностной и расчетной сеток высокого качества.
- ✓ Автоматизация построения поверхностных сеток существенно ускоряет подготовку задачи к расчету.
- ✓ Подготовка различных вариантов дискретных моделей проводится с минимальным интерактивным воздействием пользователя с помощью настройки параметров.
- ✓ Показаны примеры расчетов, проведенных на моделях, подготовленных в препроцессоре пакета программ «Логос», на основе различных поверхностных сеток.

Спасибо за внимание

Евстифеева Елена Олеговна
Научный сотрудник
Институт Теоретической и Математической Физики

Тел.: 8 (83130) 2-76-01 (1094)

01.06.2023