

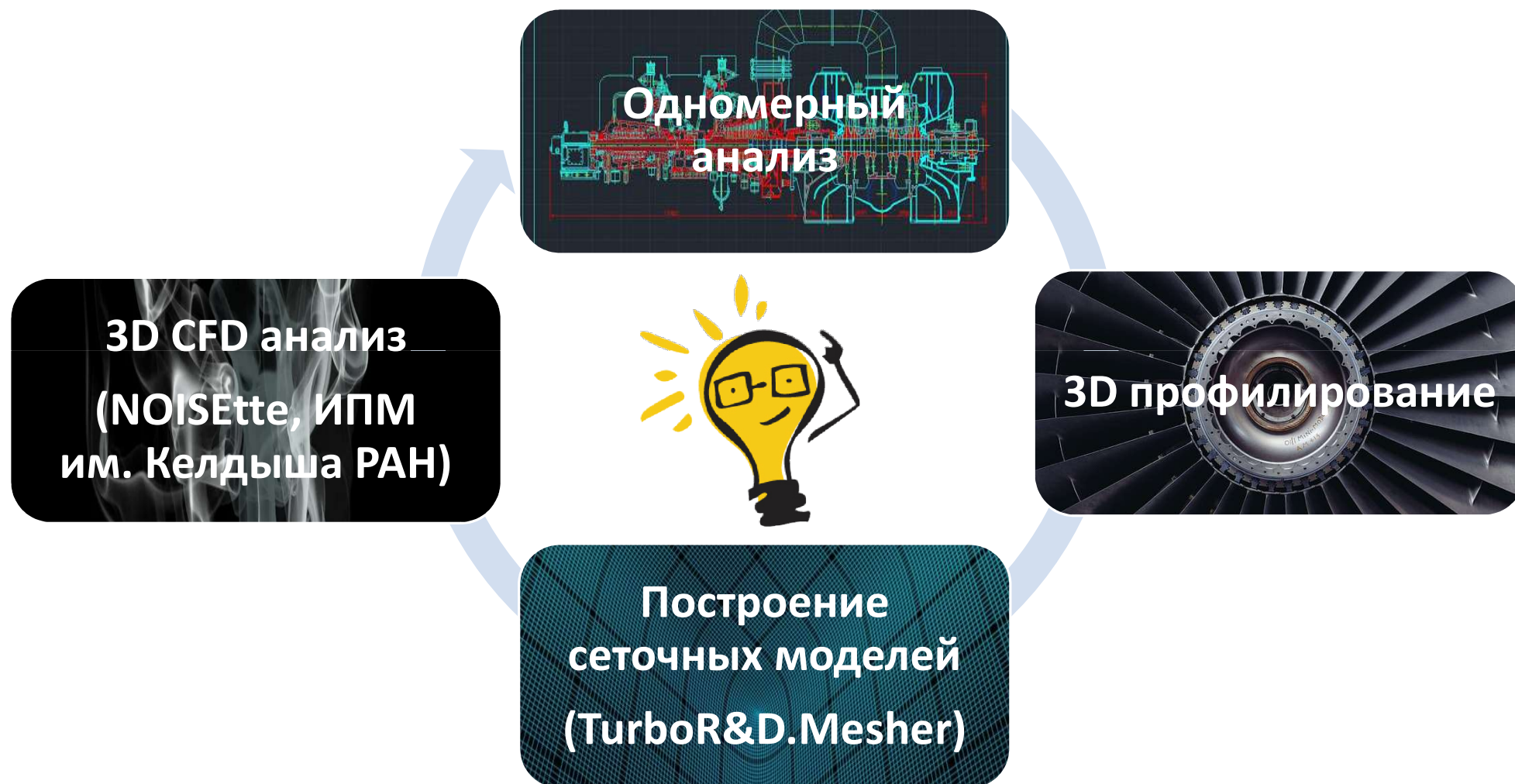


Программный комплекс **TurboR&D.Mesher**. Достижения 2021 года.

Инженерный центр численных исследований
Р.А. Загитов, Н.В. Шуваев

CFD Weekend 2021

Система проектирования и расчета турбомашин TurboR&D



Введение



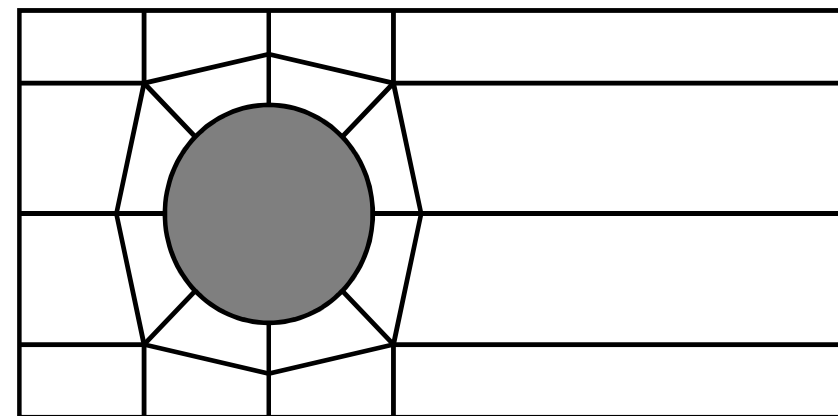
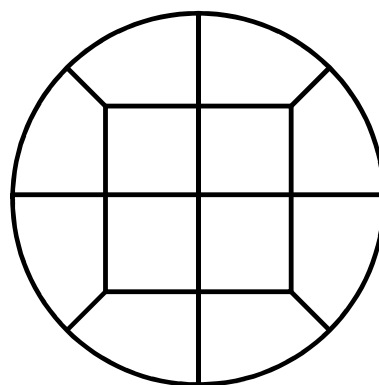
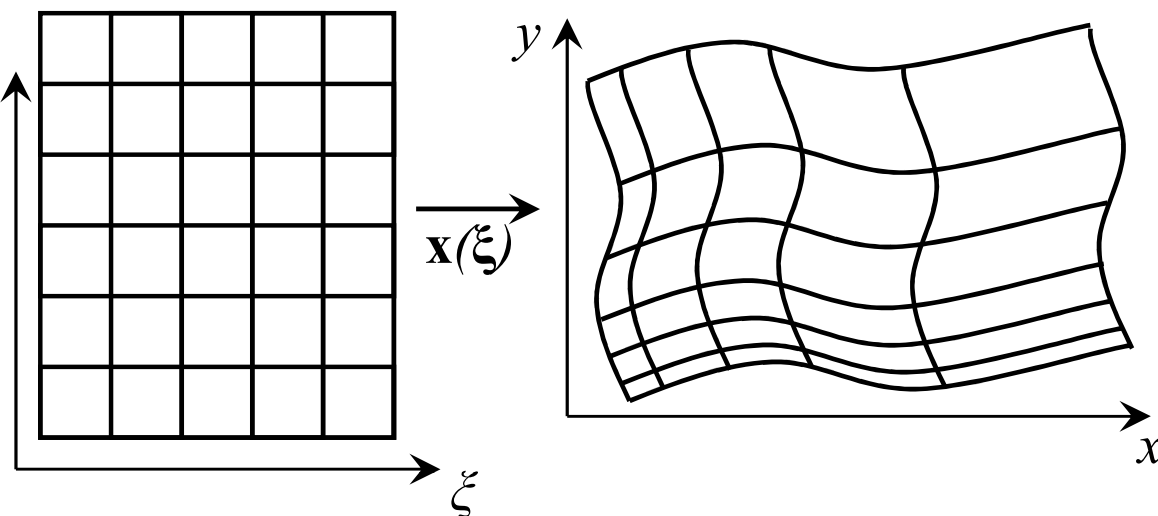
Цель – построение взаимнооднозначного отображения η $x(\xi)$, или определение координат всех узлов расчетной сетки.

Многоблочные расчетные сетки:

- + большая гибкость,
- наличие особенных узлов.

Требования:

- невырожденность,
- ортогональность,
- равномерность,
- изотропность.



Алгебраические методы построения расчетных сеток



Координаты внутренних узлов определяются в результате интерполяции.

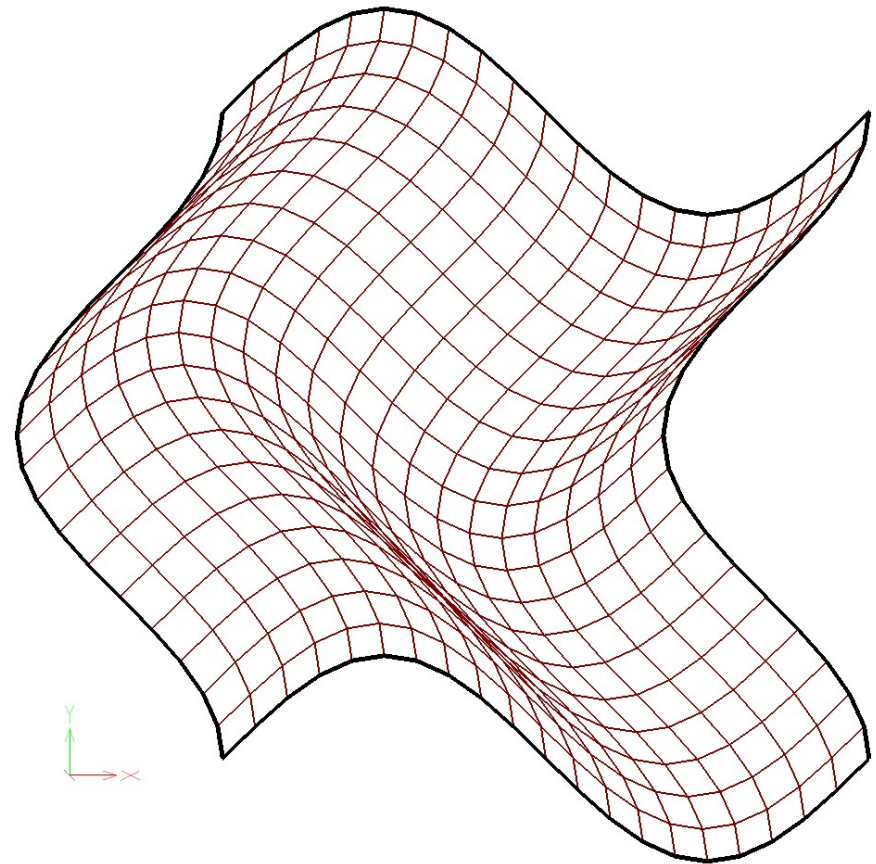
$$\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{U}_j(i) + \mathbf{V}_i(j) - \mathbf{UV}(i,j)$$

Достоинства:

1. простота реализации,
2. скорость построения,
3. интуитивно понятный контроль.

Недостатки:

1. нет гарантии получения невырожденной сетки,
2. необходимость распределения узлов вдоль границ,
3. большая трудоемкость для обеспечения качества расчетной сетки.



Дифференциальные методы построения расчетных сеток



Координаты внутренних узлов находятся из решения системы уравнений в частных производных.

Достоинства:

1. простота реализации,
2. скорость построения.

Недостатки:

1. нет гарантии получения невырожденной сетки,
2. необходимость распределения узлов вдоль границ,
3. нет возможности гибкого управления сеткой.

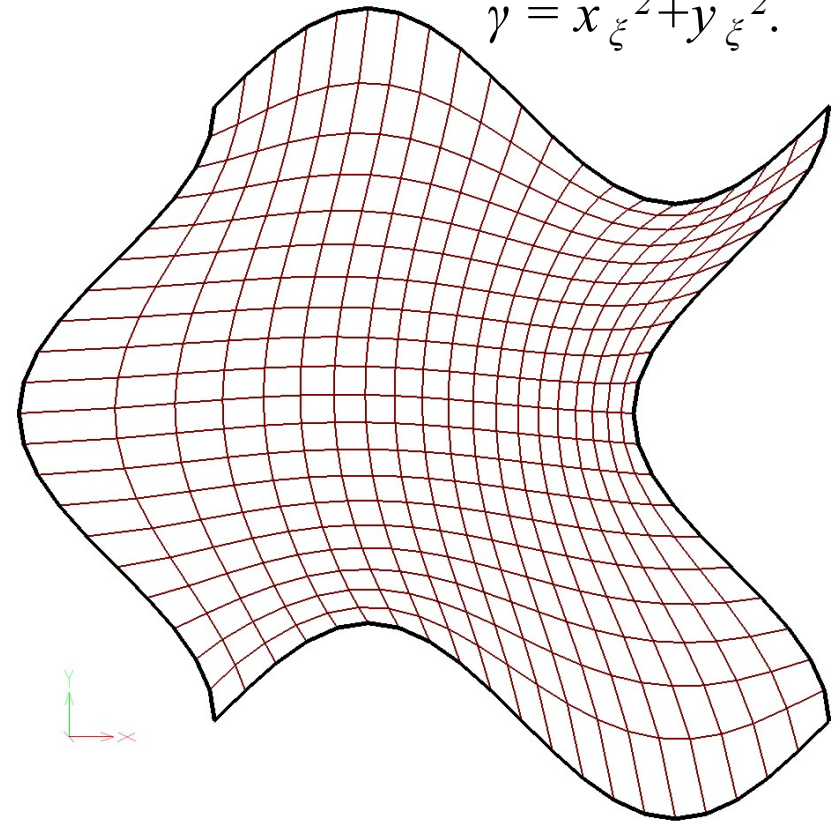
$$\alpha x_{\xi\xi} - 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} = 0,$$

$$\alpha y_{\xi\xi} - 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} = 0,$$

$$\alpha = x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2,$$

$$\beta = x_{\xi} x_{\eta} + y_{\xi} y_{\eta},$$

$$\gamma = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2.$$



Вариационные методы построения расчетных сеток



Координаты всех узлов находятся в результате минимизации какого-либо функционала.

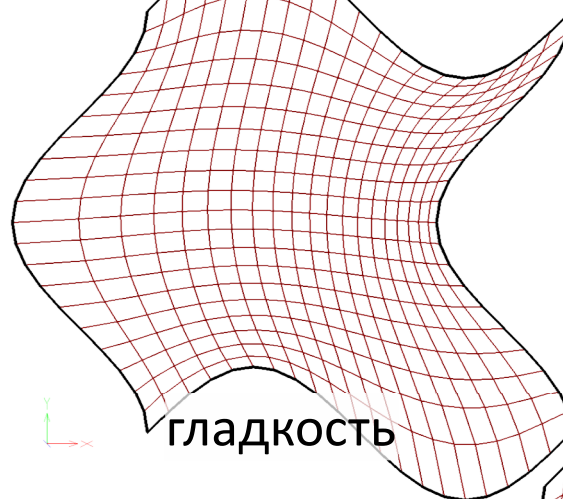
Достоинства:

1. наличие барьерных функционалов – гарантия невырожденности,
2. единый алгоритм для граничных и внутренних узлов,
3. возможность комбинирования функционалов.

Недостатки:

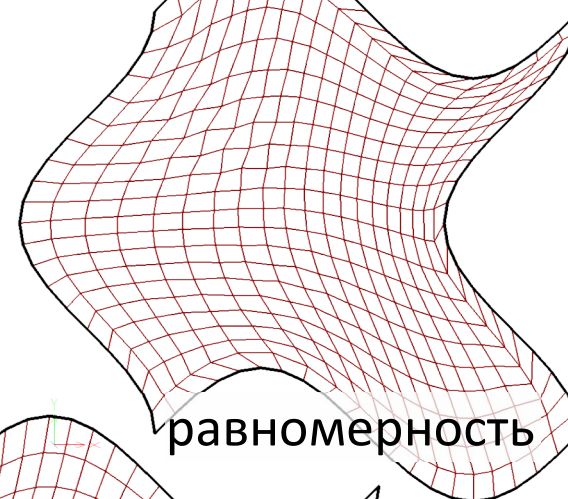
1. сложность реализации,
2. время построения.

$$J=f1(\{x\}_{ij})\rightarrow min$$



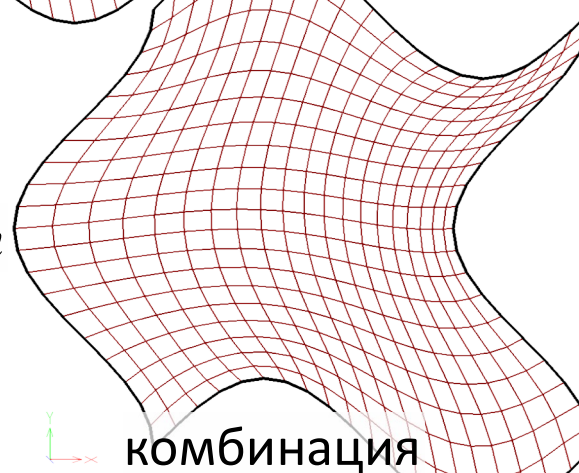
гладкость

$$J=f2(\{x\}_{ij})\rightarrow min$$



равномерность

$$J=f1+f2\rightarrow min$$



комбинация

Основной функционал



Функционал с управляющей метрикой:

$$\mathbf{x}(\mathbf{X}): \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3, h_{ij} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial X^i} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial X^j}.$$

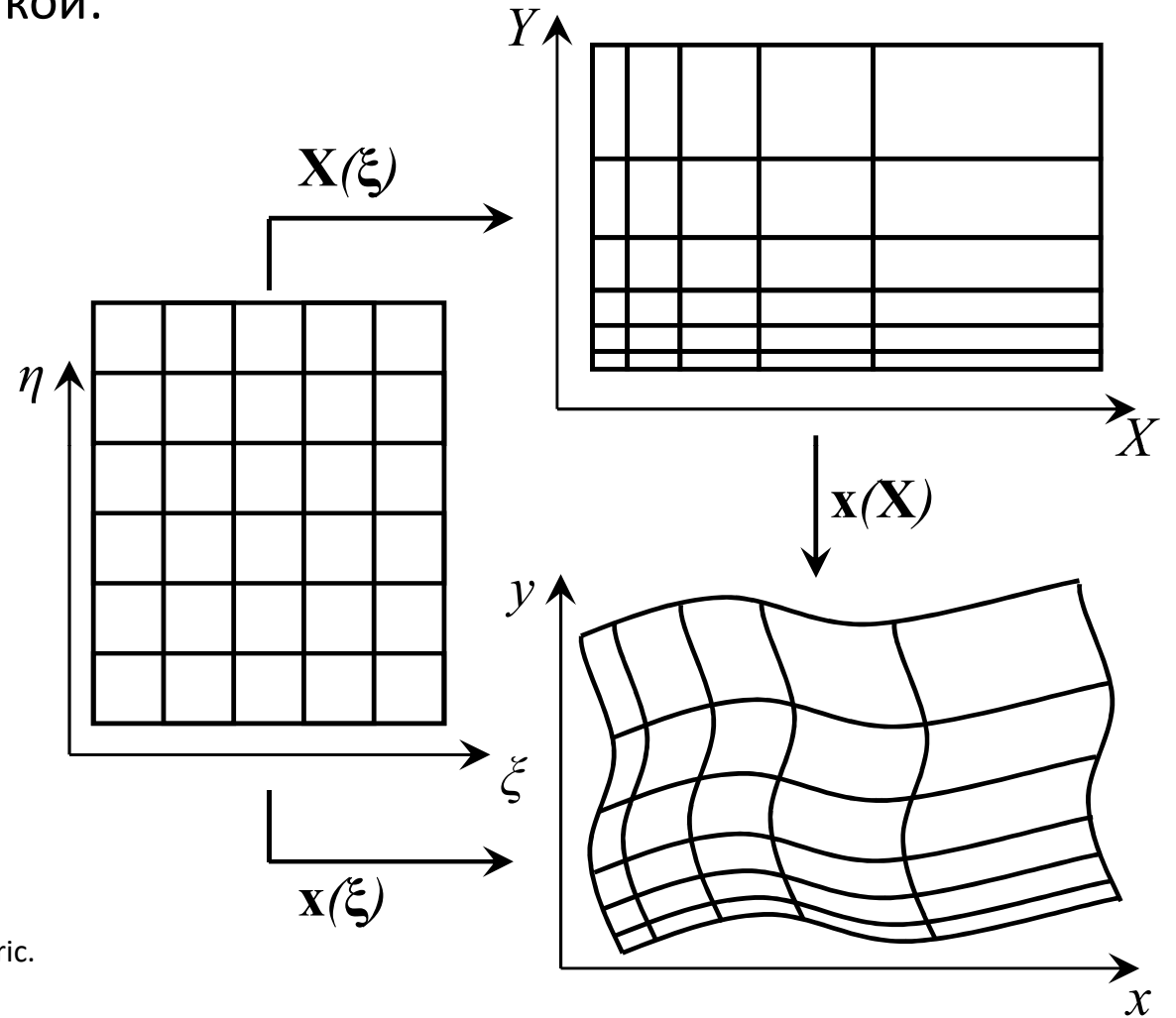
$$\mathbf{x}(\boldsymbol{\xi}): \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3, g_{ij} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \xi^i} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \xi^j},$$

$$\mathbf{X}(\boldsymbol{\xi}): \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3, G_{ij} = \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \xi^i} \cdot \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \xi^j},$$

$$\mathbf{h} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{g}.$$

$$E_{2D} = \frac{1}{2} \int \frac{[\text{tr}(\mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{g})]^{1/2} \sqrt{\det \mathbf{G}}}{\sqrt{\det \mathbf{g}}} d\xi d\eta \rightarrow \min,$$

$$E_{3D} = \frac{1}{3^{3/2}} \int \frac{[\text{tr}(\mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{g})]^{3/2} \sqrt{\det \mathbf{G}}}{\sqrt{\det \mathbf{g}}} d\xi d\eta d\zeta \rightarrow \min.$$



Azarenok B.N. A variational hexahedral grid generator with control metric.
J. Comput. Phys., v.218, 2006, pp.720-747.

+7 (921) 922 9645

WEB: WWW.RESCENT.RU

EMAIL: CONTACT@RESCENT.RU 7

Дискретизация функционала, барьерное свойство

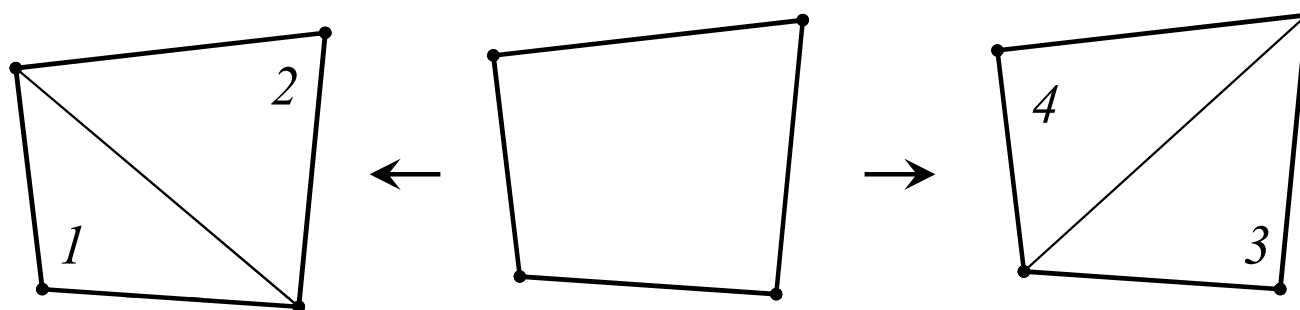


В знаменателе функционала якобиан отображения $\mathbf{x}(\xi)$ – функционал обладает барьерным свойством при соответствующей дискретизации.

$$E_{2D} =$$

$$= \frac{1}{2} \int \frac{[\text{tr}(\mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{g})]^{1/2} \sqrt{\det \mathbf{G}}}{\sqrt{\det \mathbf{g}}} d\xi d\eta \approx$$

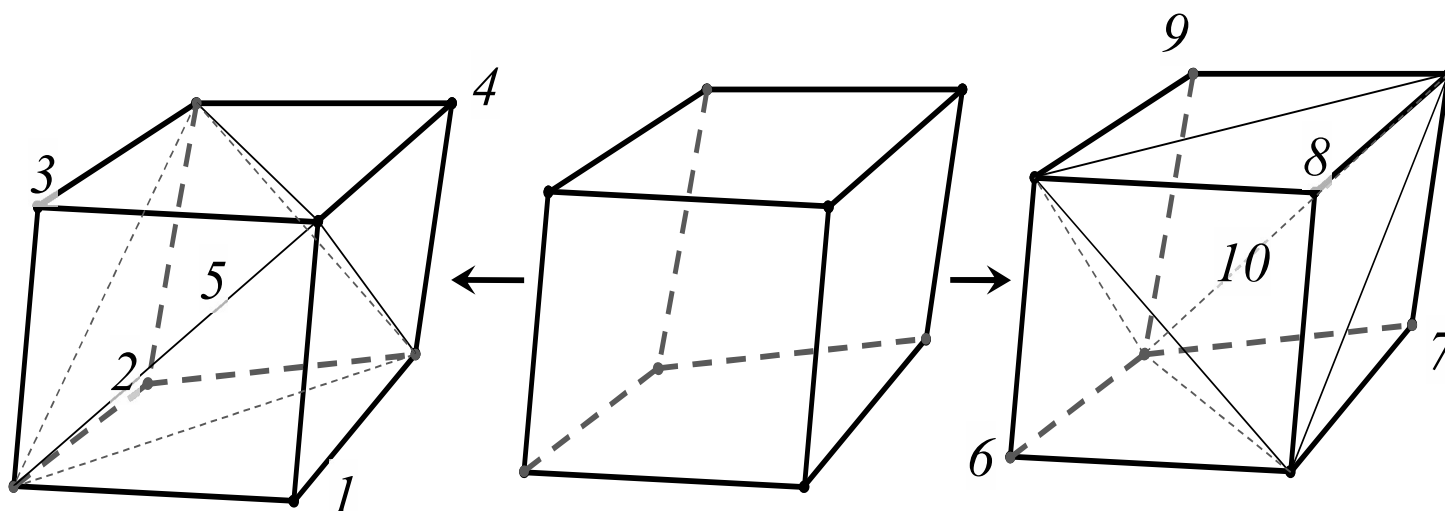
$$\approx \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N_{\text{cells}}} \sum_{k=1}^4 \frac{\sqrt{\text{tr}(\mathbf{G}_{n,k}^{-1} \cdot \mathbf{g}_{n,k})} \sqrt{\det \mathbf{G}_{n,k}}}{\sqrt{\det \mathbf{g}_{n,k}}}$$



$$E_{3D} =$$

$$= \frac{1}{3^{3/2}} \int \frac{[\text{tr}(\mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{g})]^{3/2} \sqrt{\det \mathbf{G}}}{\sqrt{\det \mathbf{g}}} d\xi d\eta d\zeta \approx$$

$$\approx \frac{1}{3^{3/2}} \sum_{n=1}^{N_{\text{cells}}} \sum_{k=1}^{10} \frac{[\text{tr}(\mathbf{G}_{n,k}^{-1} \cdot \mathbf{g}_{n,k})]^{3/2} \sqrt{\det \mathbf{G}_{n,k}}}{\sqrt{\det \mathbf{g}_{n,k}}}$$

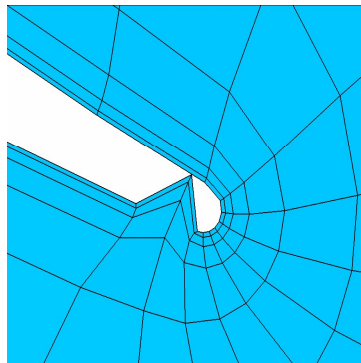


Распутывание расчетной сетки

Регуляризованный функционал для построения невырожденной сетки:

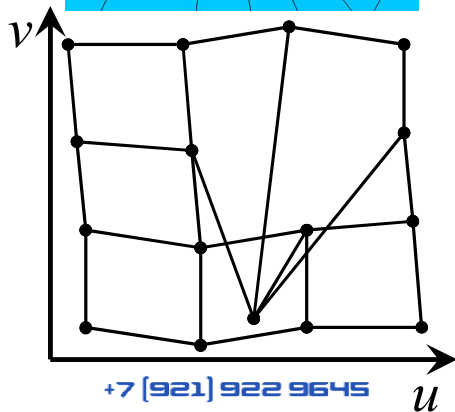
$$J_\varepsilon = (J + \sqrt{J^2 + \varepsilon^2})/2$$

Необходимость дополнительного контроля:



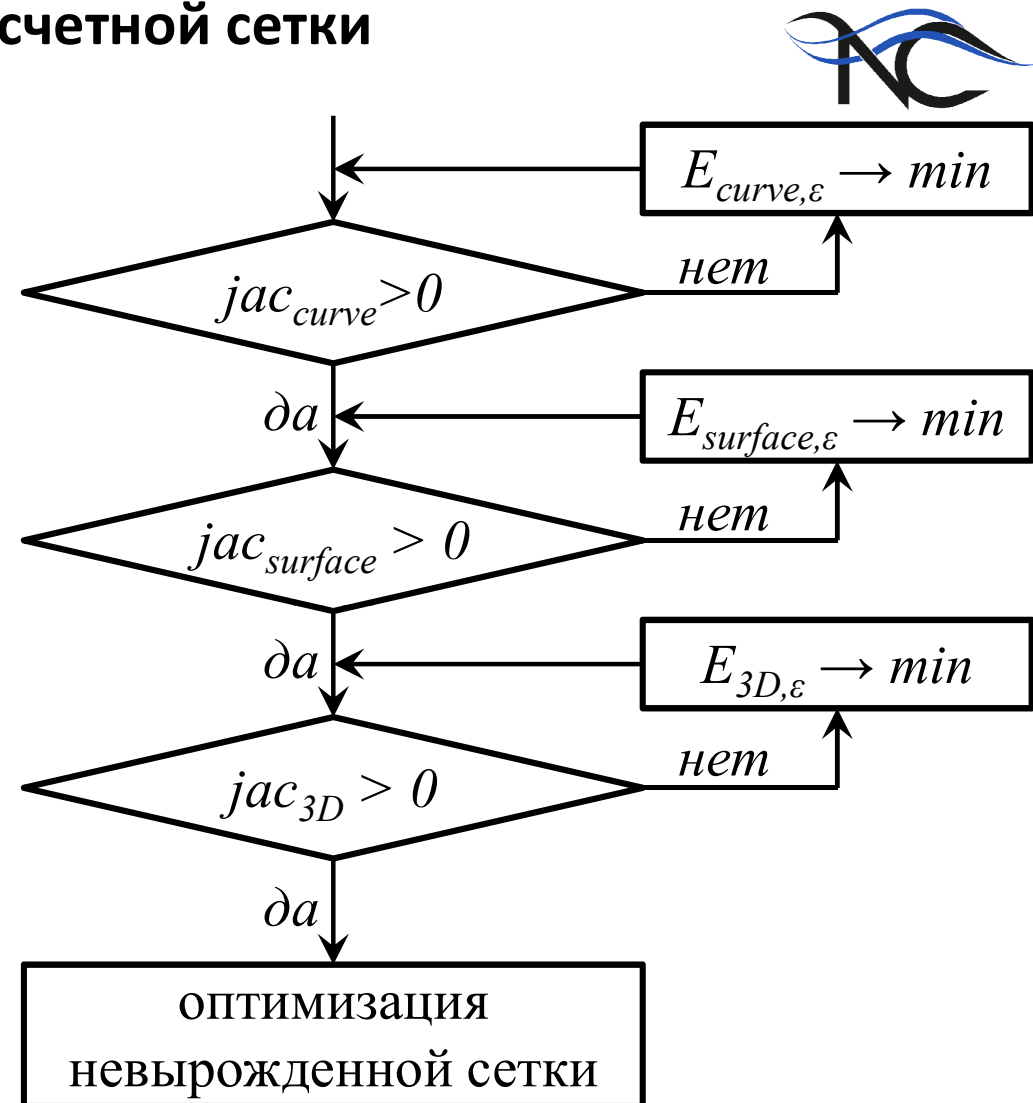
Сечение сетки по одному из индексов:

1. все 3D ячейки не вырожденные,
2. в терминах сетки на поверхности лопатки 2D ячейки вырожденные.



+7 (921) 922 9645

и



Определение целевых форм и размеров ячеек



С точки зрения качества расчетной сетки:

1. ортогональность – целевые формы всех ячеек прямоугольные параллелепипеды,
2. равномерность – критерий оптимизации целевых размеров,
3. изотропность и плотность – ограничения при оптимизации.

Найти: $\{\mathbf{L}\}_n$,

$$J = \sum_{n=1}^{N_{cells}} \sum_{d=\xi,\eta} \left[af(adj_cells_{d,n}) + bf(l_{d,n}) + cf(constr_{d,n}) \right] \rightarrow \min,$$

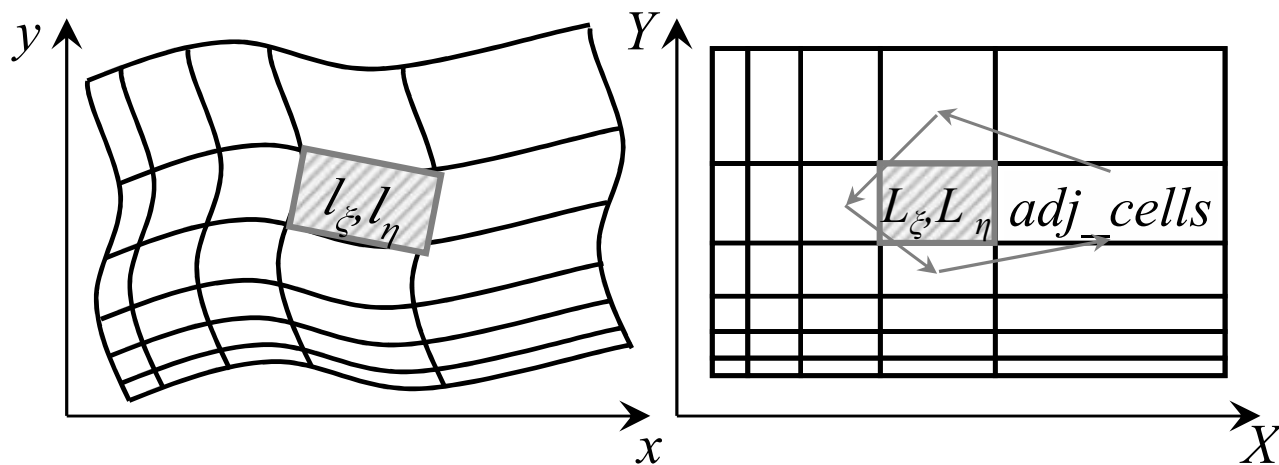
$$\forall j: \sum_i L_{\xi,ij} = \sum_i l_{\xi,ij}, \forall i: \sum_j L_{\eta,ij} = \sum_j l_{\eta,ij},$$

f – функция схожести,

a, b, c – весовые коэффициенты.

С точки зрения робастности оптимизации расчетной сетки:

1. консервативность – соответствие длин целевых и действительных сеточных линий,
2. учет текущих форм ячеек.

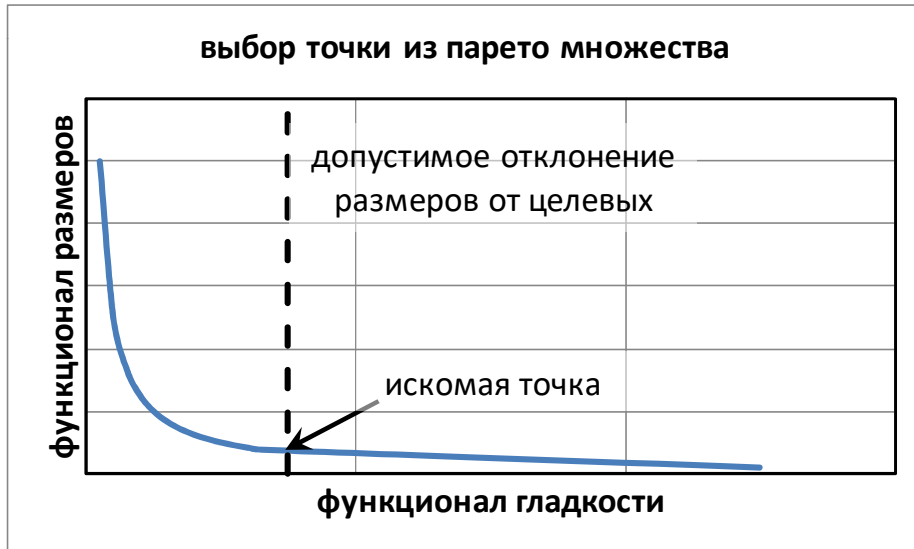
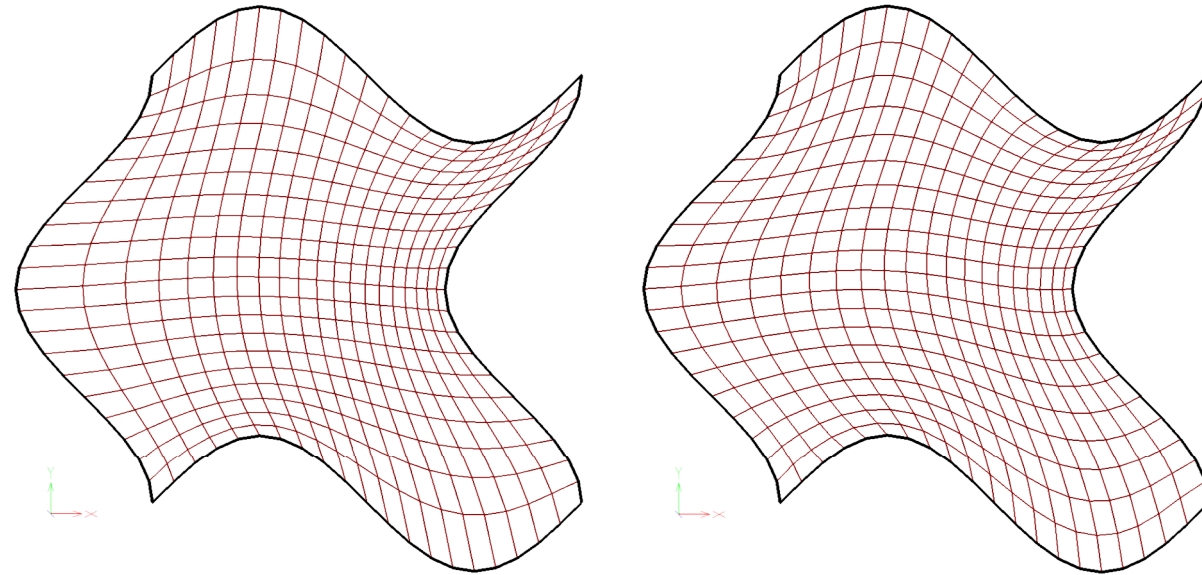


Комбинирование функционалов



Варианты:

1. Построение обобщенного функционала (линейная комбинация, произведение и т.п.)
2. Выбор точки из множества Парето



функционал гладкости: обобщенный функционал:

$$J = E \rightarrow \min$$

$$J = \alpha E + (1 - \alpha) S \rightarrow \min$$

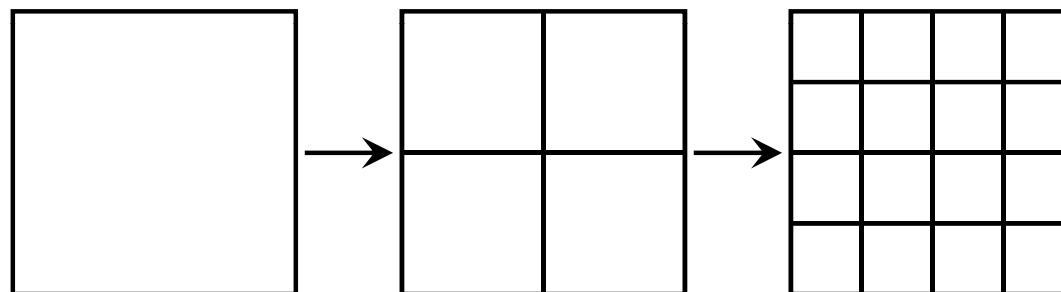
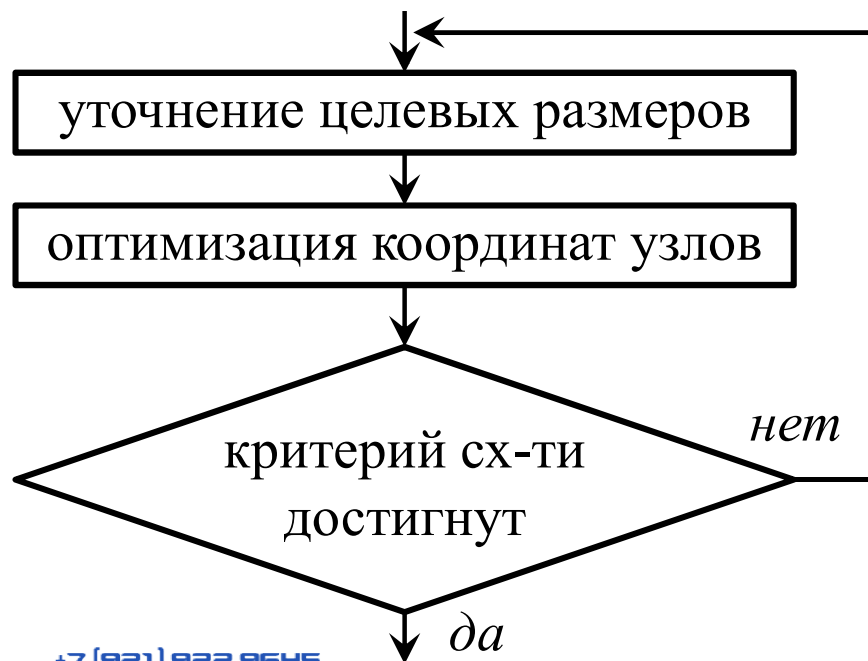
$$S = \sum_{n=1}^{N_{edges}} f(edge_n, L_n),$$

f – функция схожести.

Несколько слов об оптимизации



- Итерационное уточнение целевых размеров в процессе оптимизации
- Многосеточный подход для ускорения сходимости
- При оптимизации каждого узла:
 1. метод Ньютона-Рафсона,
 2. градиентный метод,
 3. метод Монте-Карло.

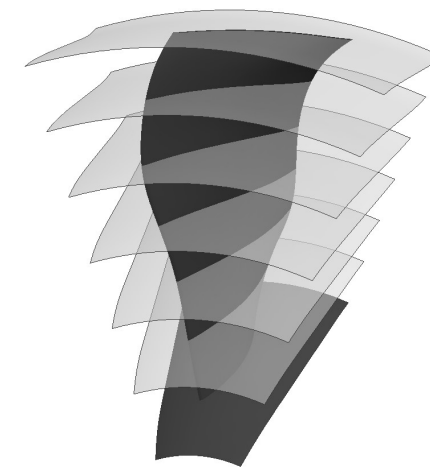
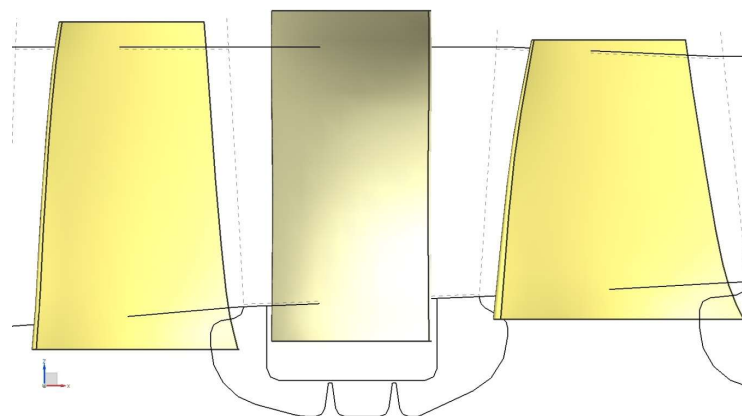
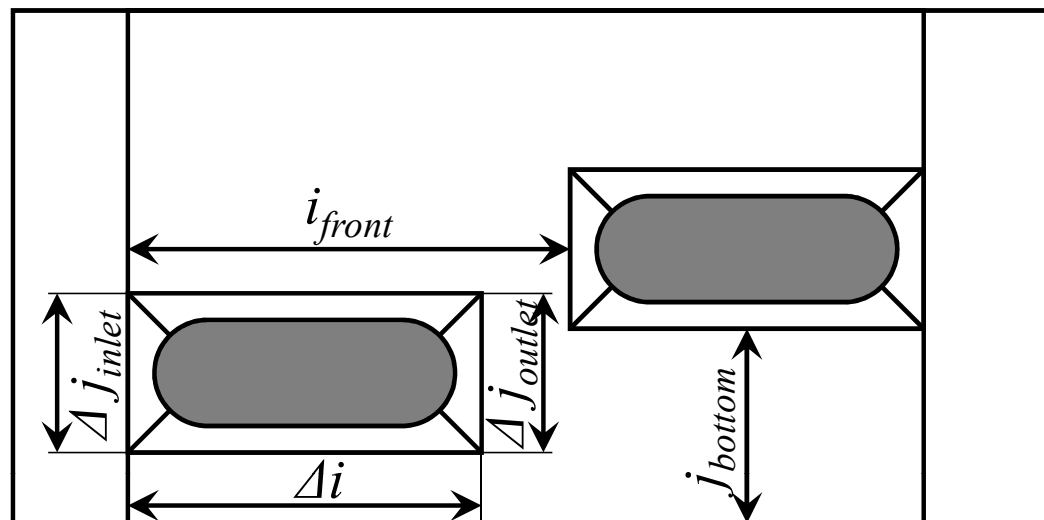


TurboR&D.Mesher, шаблон для межлопаточных каналов



Многоблочная расчетная сетка:

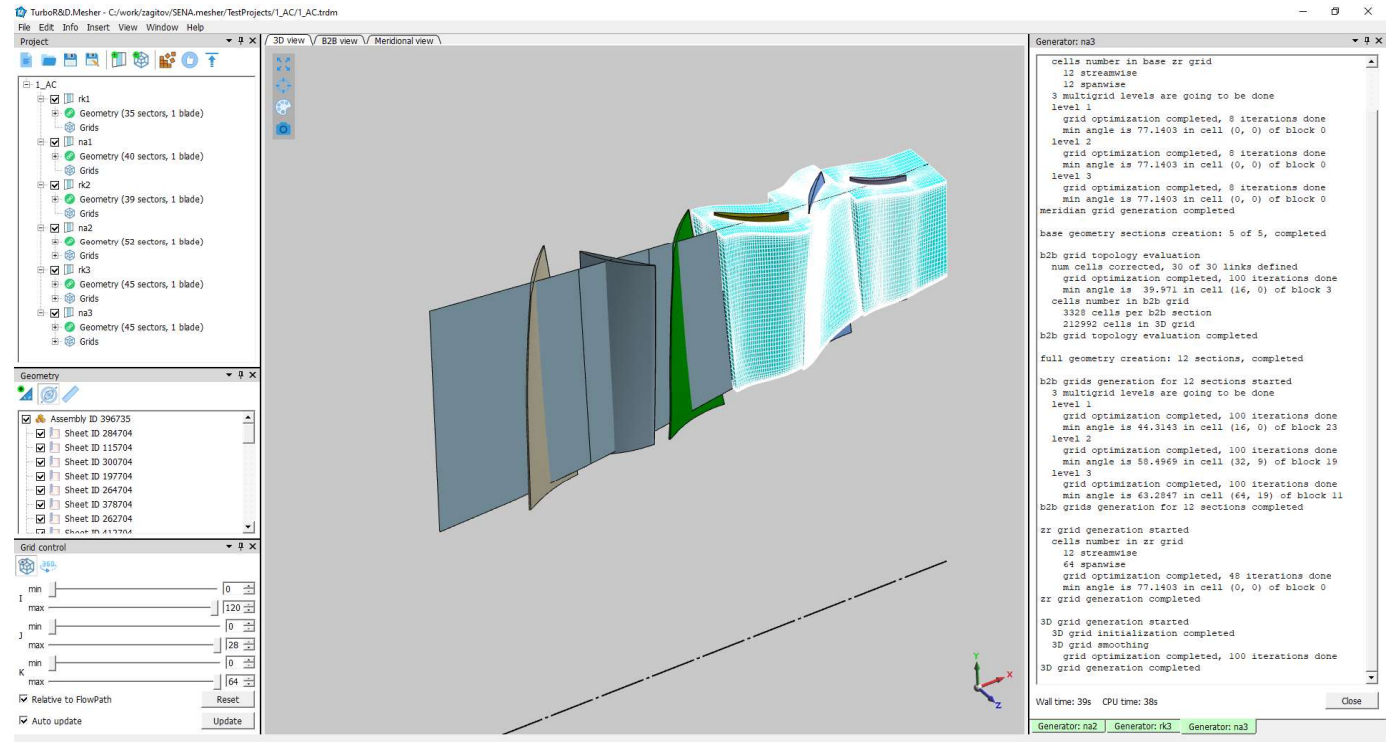
1. Н-блок с вырезами для лопаток,
2. О-блоки вокруг лопаток для реализации сгущения и локализации особенностей (радиальные зазоры, галтели и т.п.),
3. Н-блоки на входе и выходе для обособленного 2D-блокинга притрактовых полостей.



Возможности TurboR&D.Mesher v 1.1.5



- Импорт геометрии в распространенных форматах.
- Построение расчетных сеток для венцов с произвольным числом лопаток.
- Автоматическое построение расчетных сеток для венцов с 1 лопаткой.
- Учет радиальных зазоров.
- Экспорт сеток в CGNS.
- Автоматизация подготовки расчетной модели для некоторых решателей.



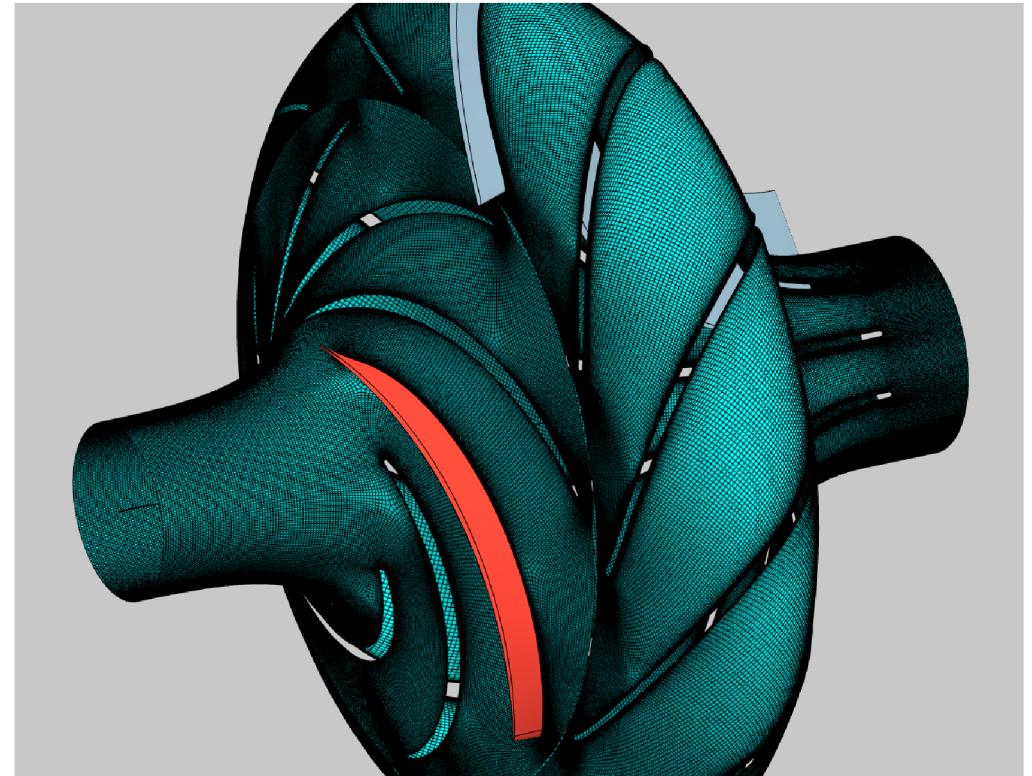
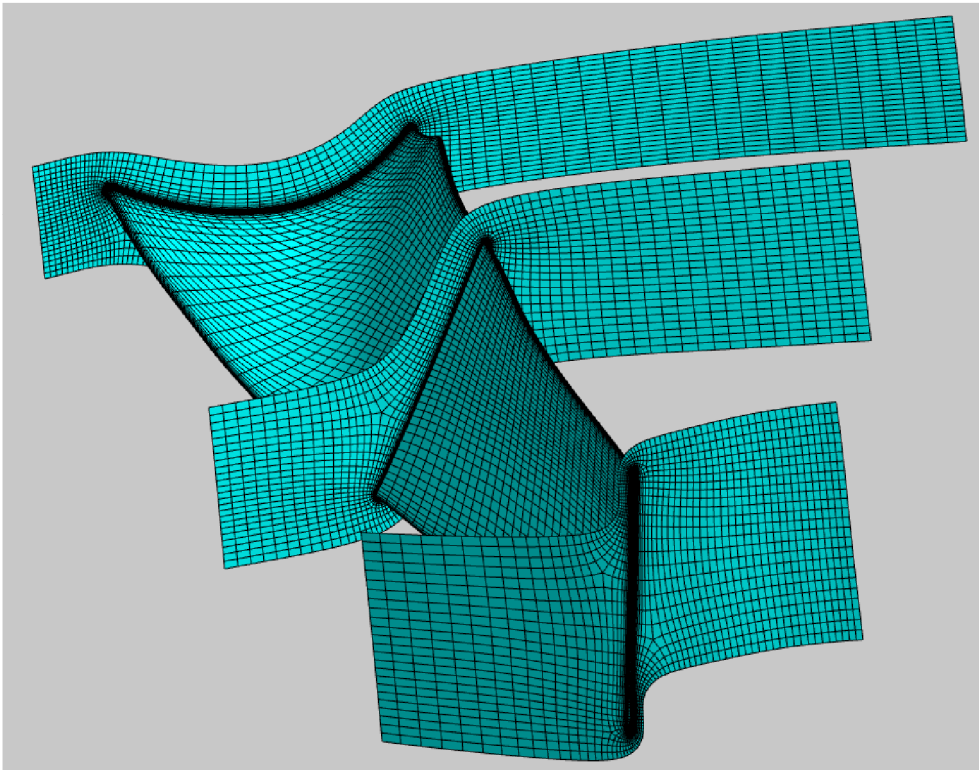
- Разработана документация с пошаговыми примерами.
- Программа полностью отчуждаемая.

Тестирование TurboR&D.Mesher v 1.1.5



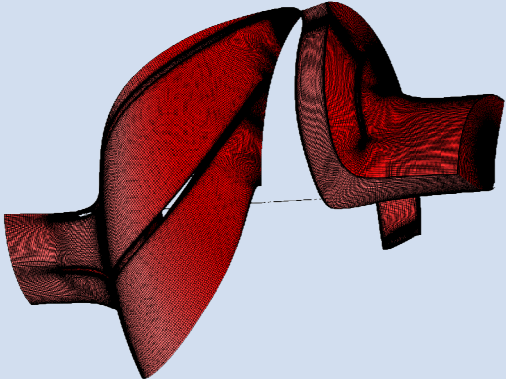
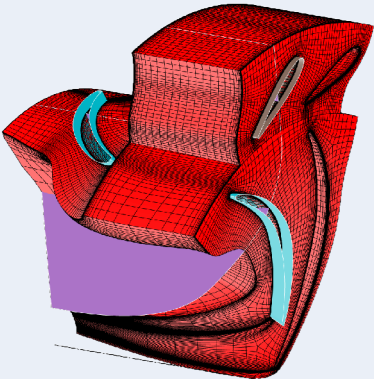
- 68 тестовых геометрий,
- 14 вариантов плотности сетки,
- с учетом зазоров и без.

Итого: 1904 тестовых случая



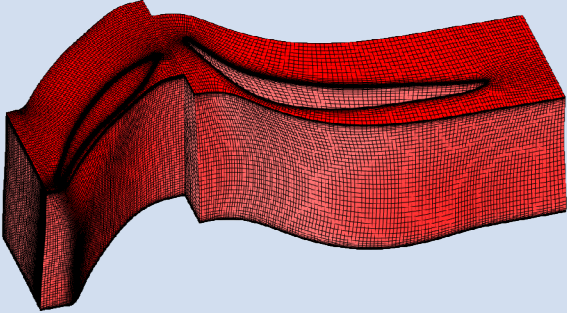
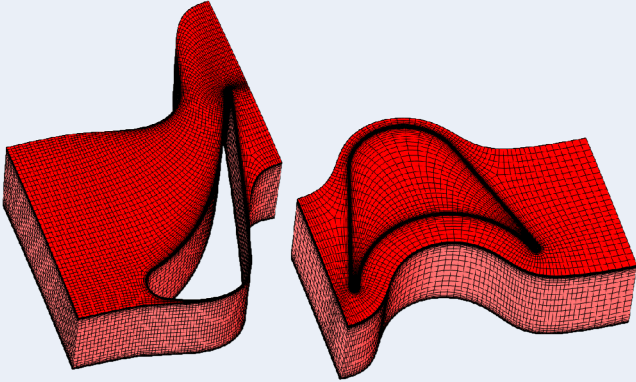
Сравнительный анализ



	AutoGrid5	TurboR&D
	Row 2: 31.1°	Row 2: 46°
	Row 1: 41.9° Row 2: 25.8°	Row 1: 55.8° Row 2: 28.7°

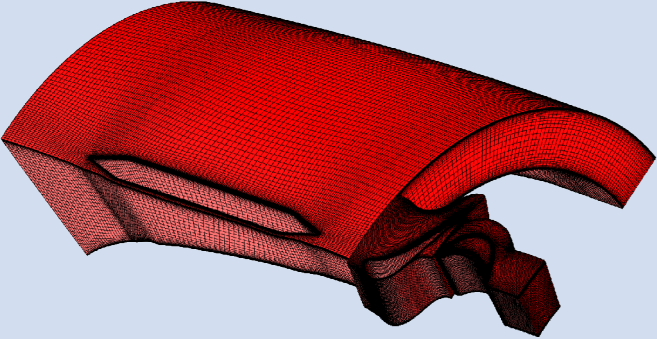
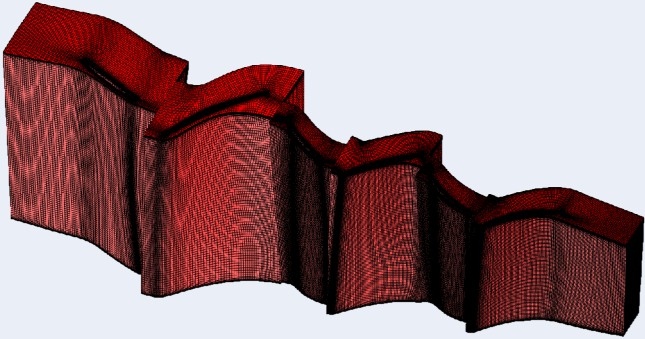
Сравнительный анализ



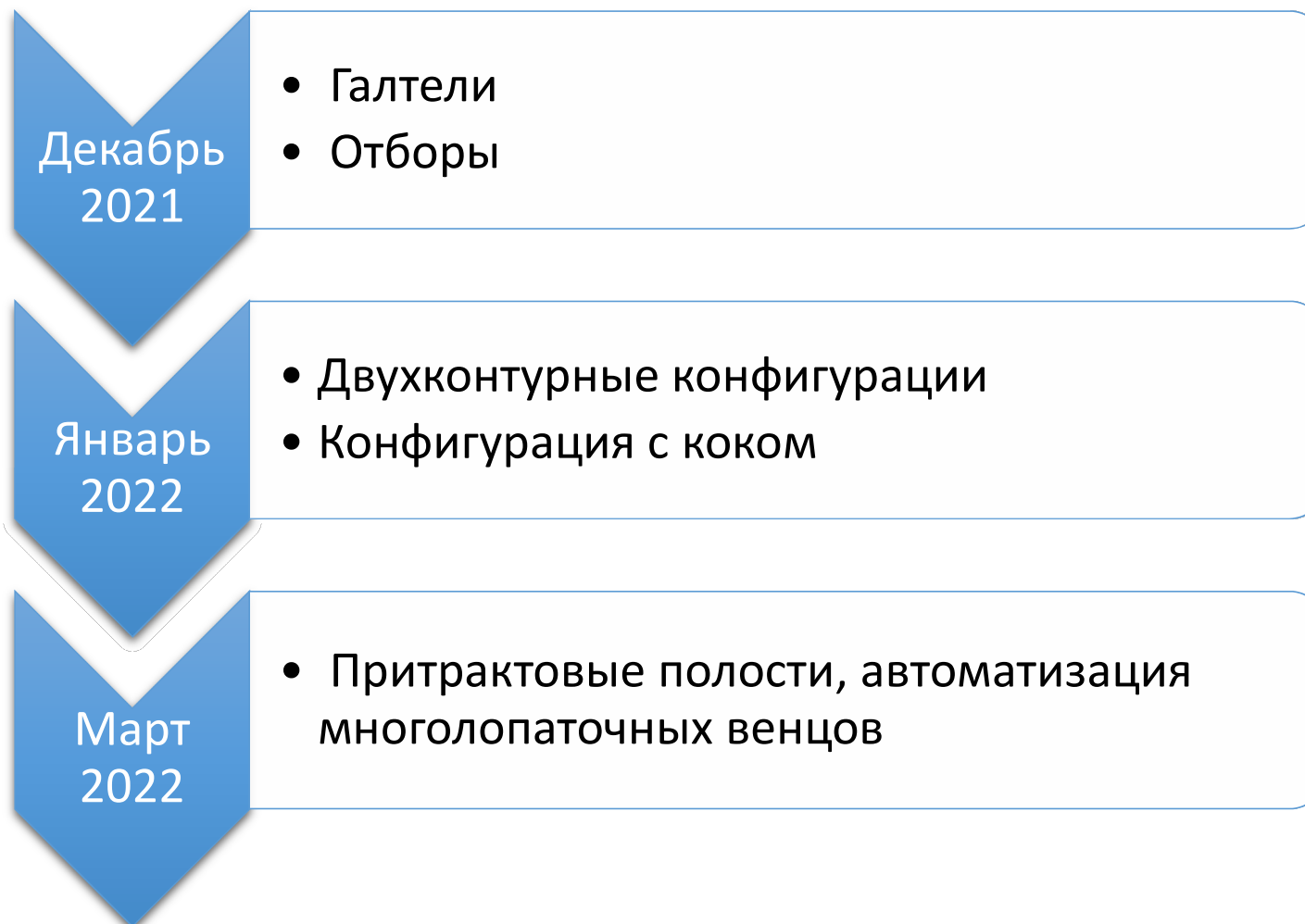
	AutoGrid5	TurboR&D
	Row 1 (зазор): 43.3° Row 2: 45.4°	Row 1 (зазор): 55.0° Row 2: 48°
	Row 1: 38.9° Row 2 (зазор): 24.9°	Row 1: 52.4° Row 2 (зазор): 55.3°

Сравнительный анализ



	AutoGrid5	TurboR&D
	Row 1: 40.2° Row 2: 22.1° Row 3 (зазор): 16.5°	Row 1: 45.7° Row 2: 59.9° Row 3 (зазор): 51.4°
	Row 1: 50.3° Row 2 (зазор): 27.2° Row 3: 36.9° Row 4 (зазор): 31.9° Row 5: 48.7° Row 6 (зазор): 40.9°	Row 1: 63.5° Row 2 (зазор): 45.9° Row 3: 67.4° Row 4 (зазор): 56.3° Row 5: 65.4° Row 6 (зазор): 56.3°

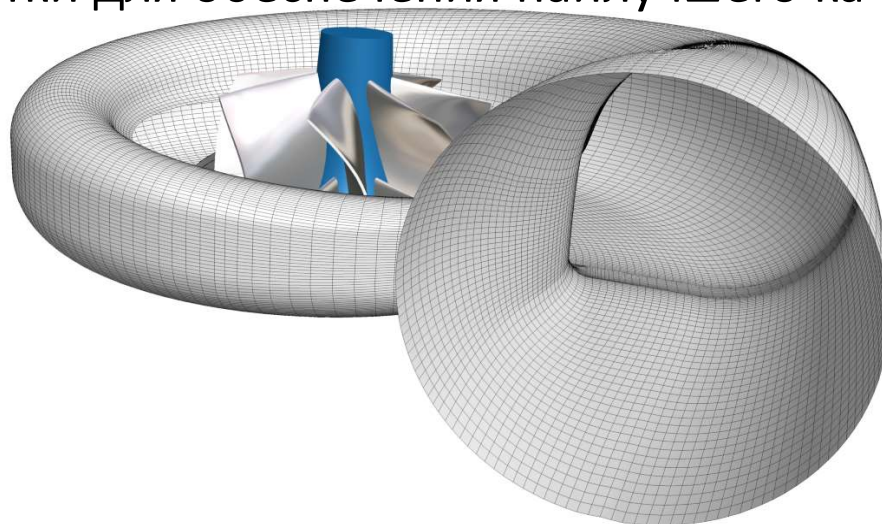
План разработки, TurboR&D.Mesher

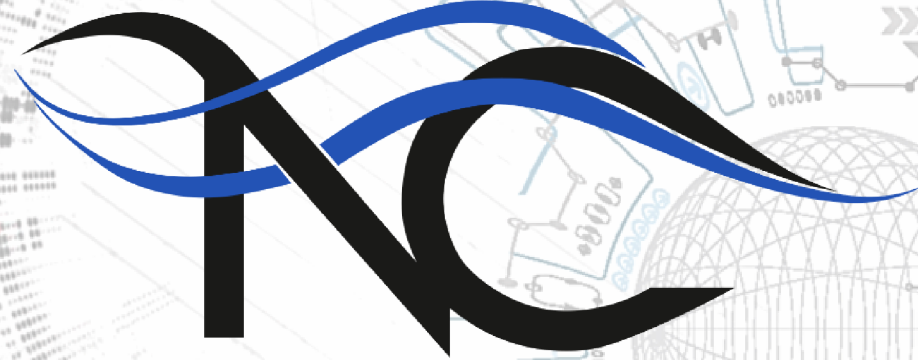


План разработки, универсальный многоблочный сеточник



1. Импорт геометрии, экспорт сетки в стандартных форматах
2. Создание произвольного шаблона расчетной сетки:
 1. топология - определение числа блоков, их размерностей и связей
 2. ассоциации - логическая привязка сетки к геометрии
 3. задание параметров плотности сетки (сгущения, коэффициенты роста...)
 4. автоматический «блокинг» в 2D.
3. Построение сетки:
 1. инициализация сетки алгебраическими методами
 2. оптимизация сетки для обеспечения наилучшего качества.





Инженерный Центр Численных Исследований

Благодарю за внимание!