

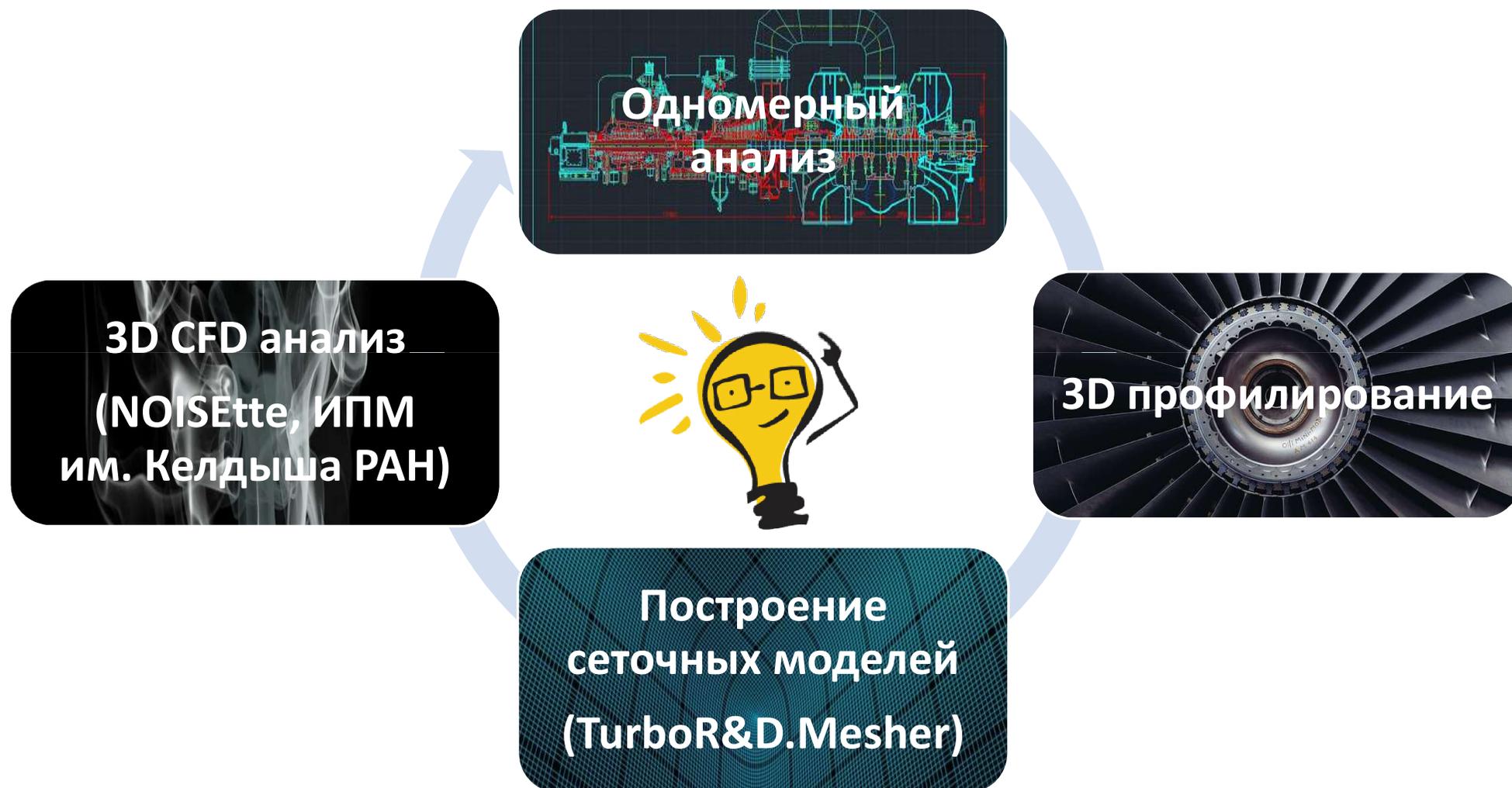


# Программный комплекс **TurboR&D.Mesher.** Достижения 2021 года.

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

CFD Weekend 2021

# Система проектирования и расчета турбомашин TurboR&D



## Введение



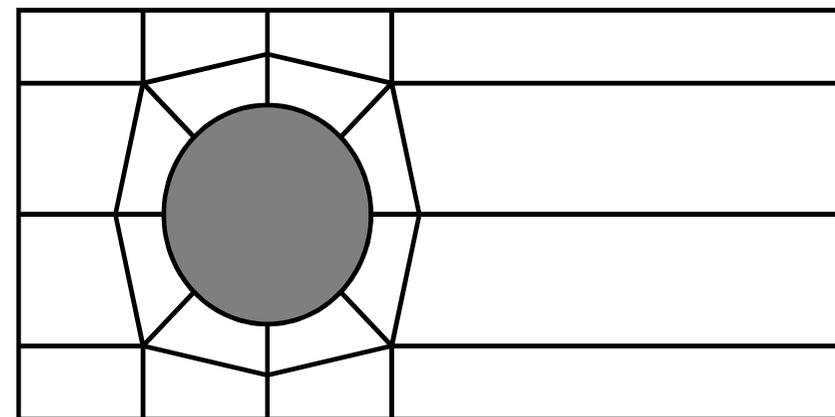
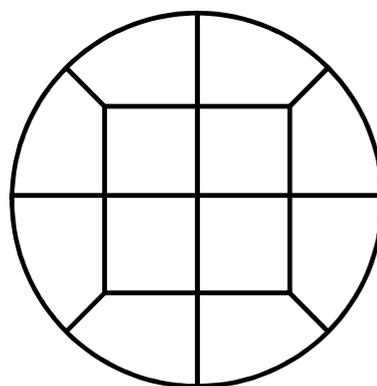
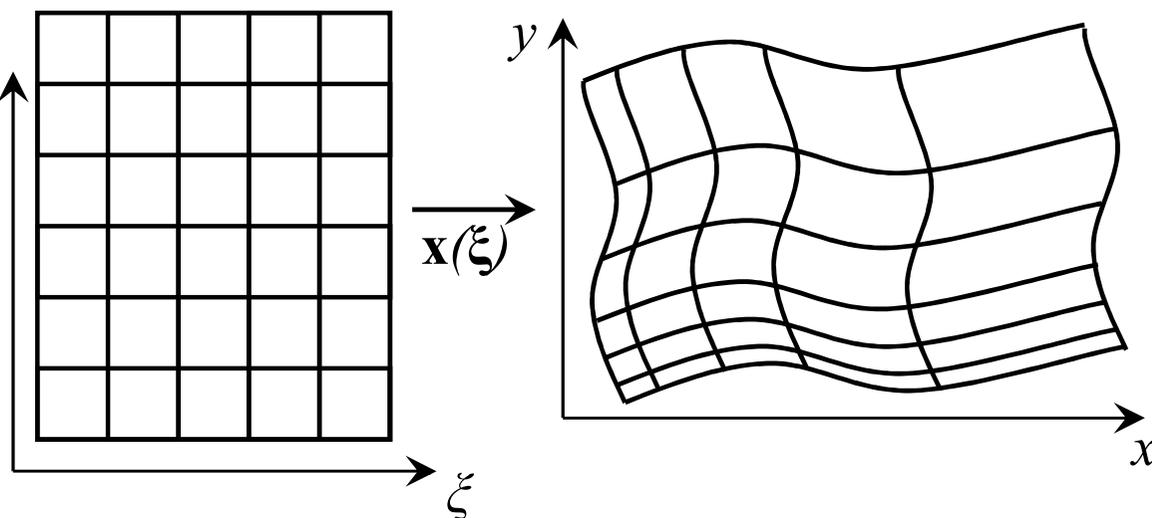
**Цель** – построение взаимнооднозначного отображения  $\eta$   $x(\xi)$ , или определение координат всех узлов расчетной сетки.

### 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.

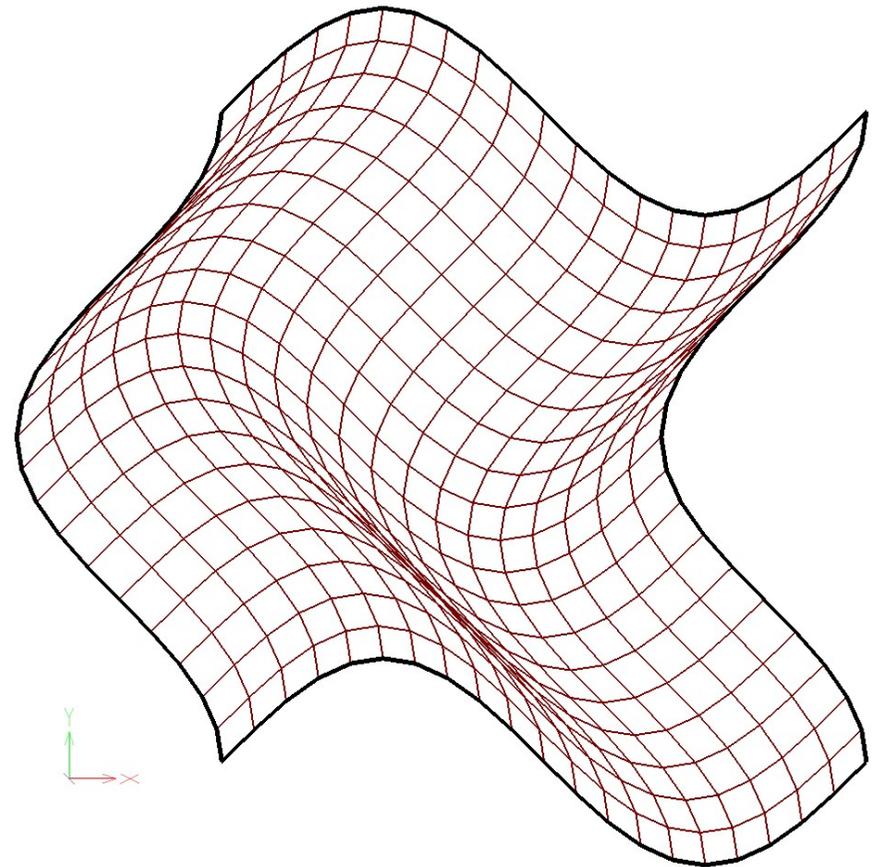
$$\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{U}_j(i) + \mathbf{V}_i(j) - \mathbf{UV}(i,j)$$

## 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.

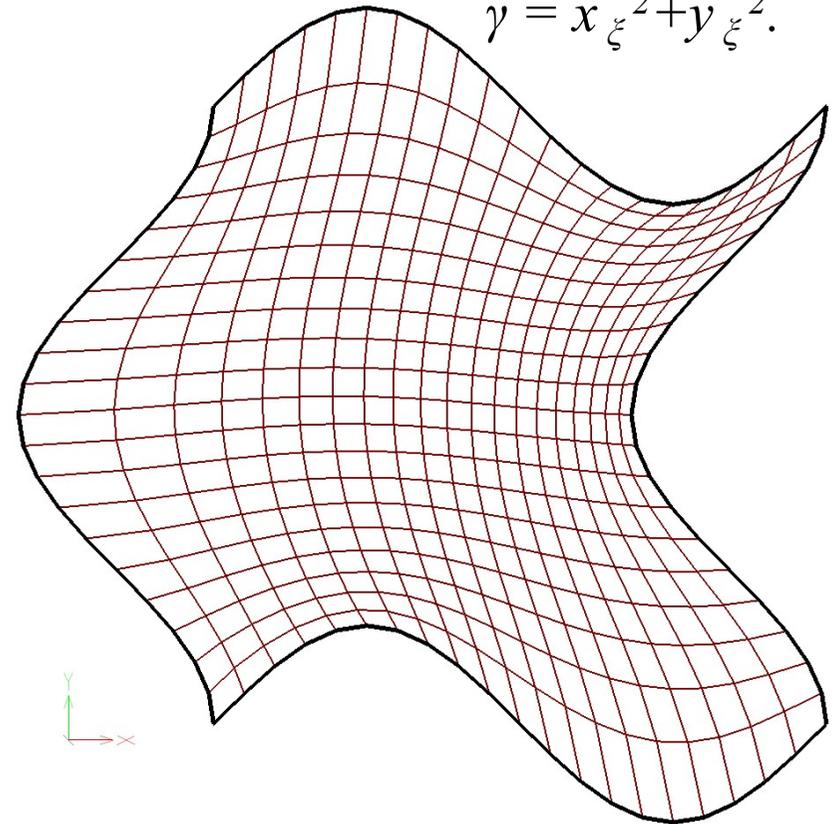
$$\alpha x_{\xi\xi} - 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} = 0,$$

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

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

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

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



## Вариационные методы построения расчетных сеток



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

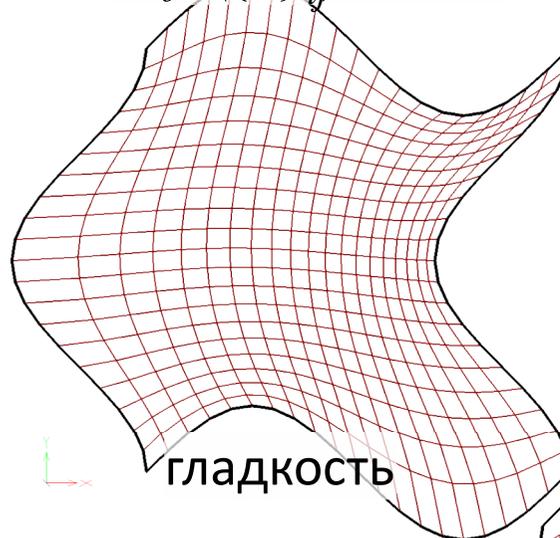
### Достоинства:

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

### Недостатки:

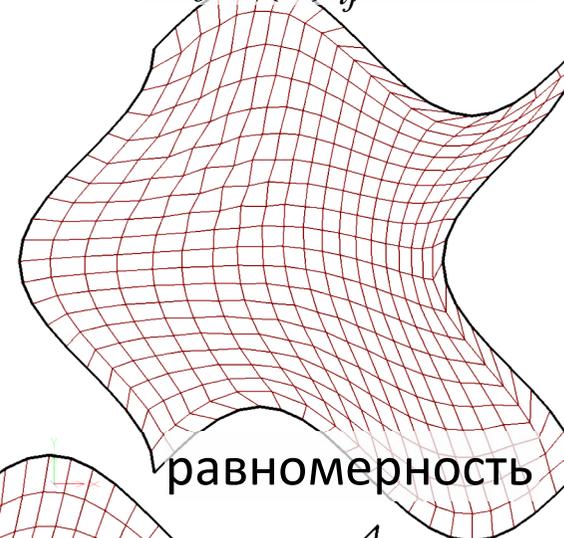
1. сложность реализации,
2. время построения.

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



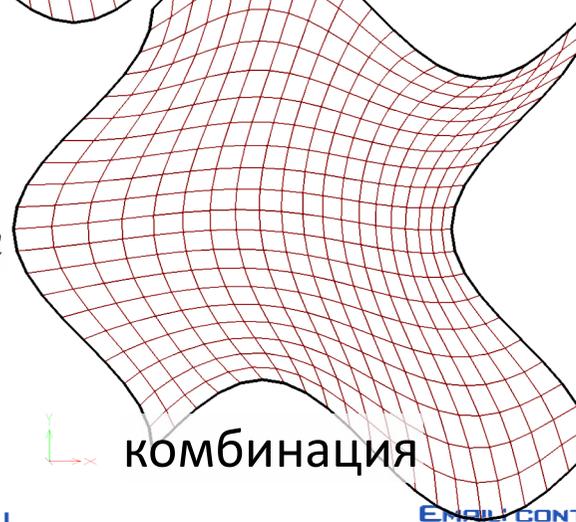
гладкость

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



равномерность

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



комбинация

# Основной функционал



Функционал с управляющей метрикой:

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

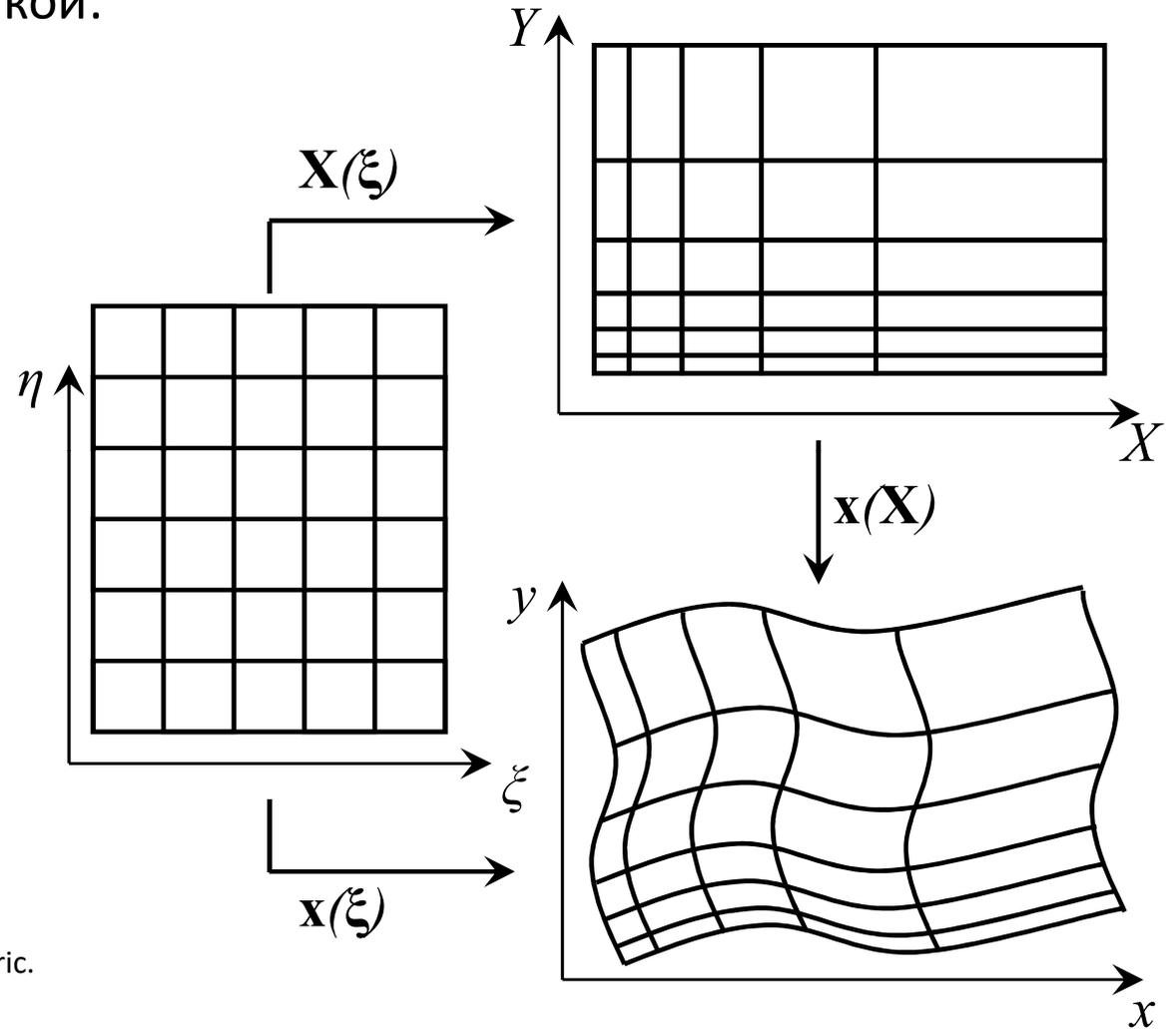
$$\mathbf{x}(\boldsymbol{\xi}): \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3, g_{ij} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \xi^i} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \xi^j},$$

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

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

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

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



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

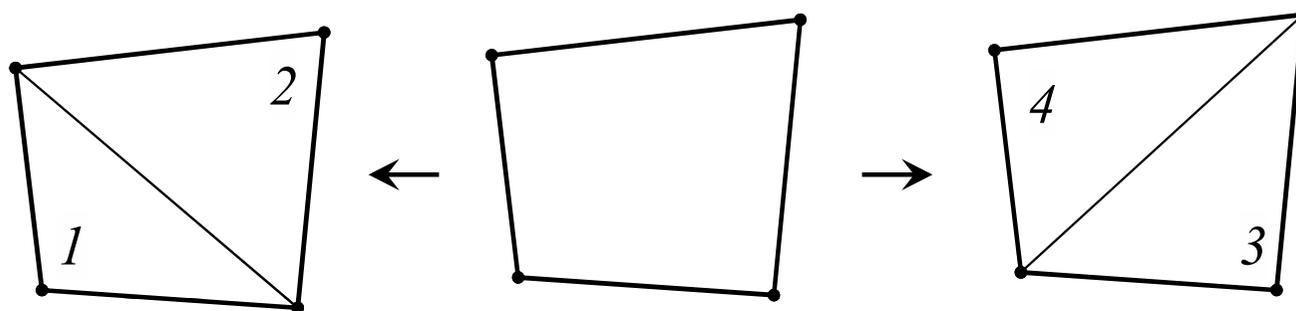


В знаменателе функционала якобиан отображения  $\mathbf{x}(\xi)$  – функционал обладает барьерным свойством при соответствующей дискретизации.

$$E_{2D} =$$

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

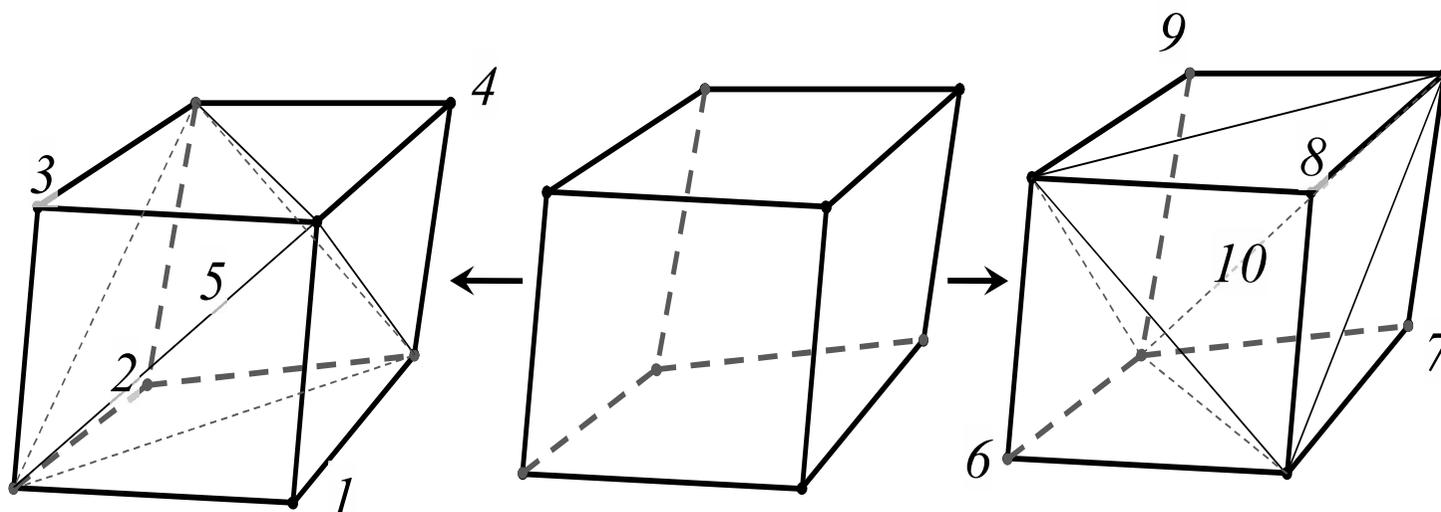
$$\approx \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N_{\text{cells}}} \sum_{k=1}^4 \frac{\sqrt{\text{tr}(\mathbf{G}_{n,k}^{-1} \cdot \mathbf{g}_{n,k})} \sqrt{\det \mathbf{G}_{n,k}}}{\sqrt{\det \mathbf{g}_{n,k}}}$$



$$E_{3D} =$$

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

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

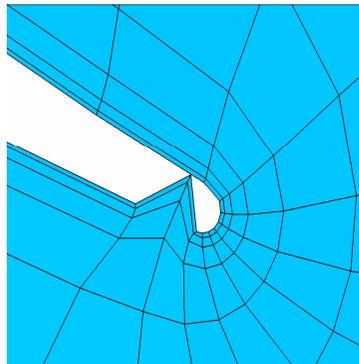


## Распутывание расчетной сетки

Регуляризованный функционал для построения невырожденной сетки:

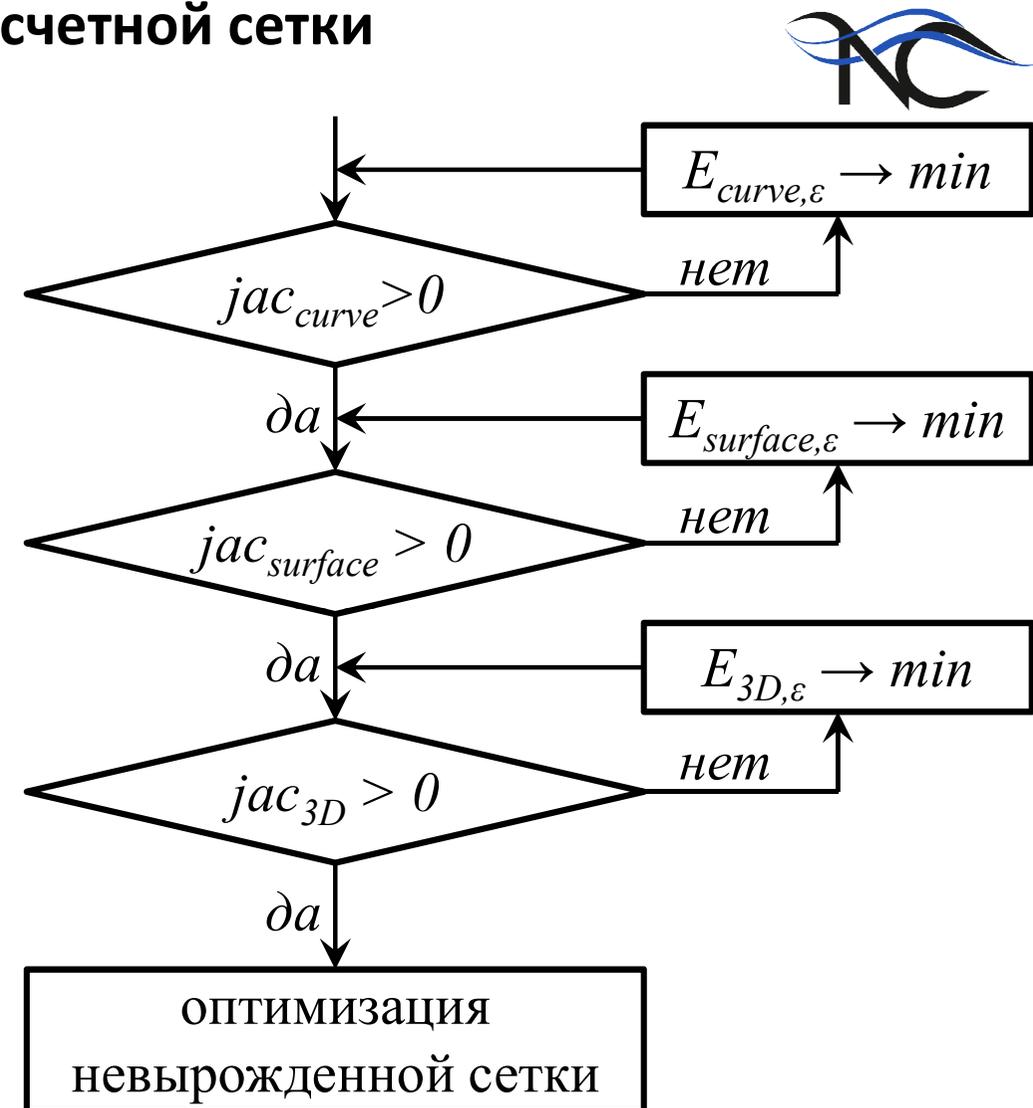
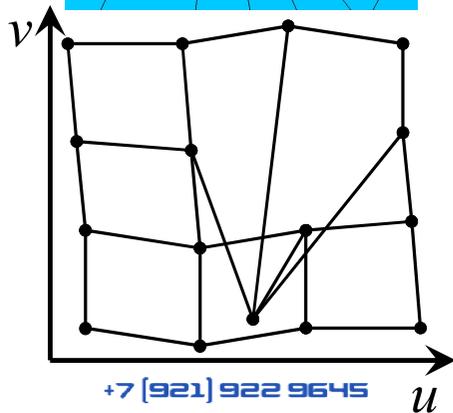
$$J_\varepsilon = (J + \sqrt{J^2 + \varepsilon^2})/2$$

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.



## 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:  $\{\mathbf{L}\}_n$ ,

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

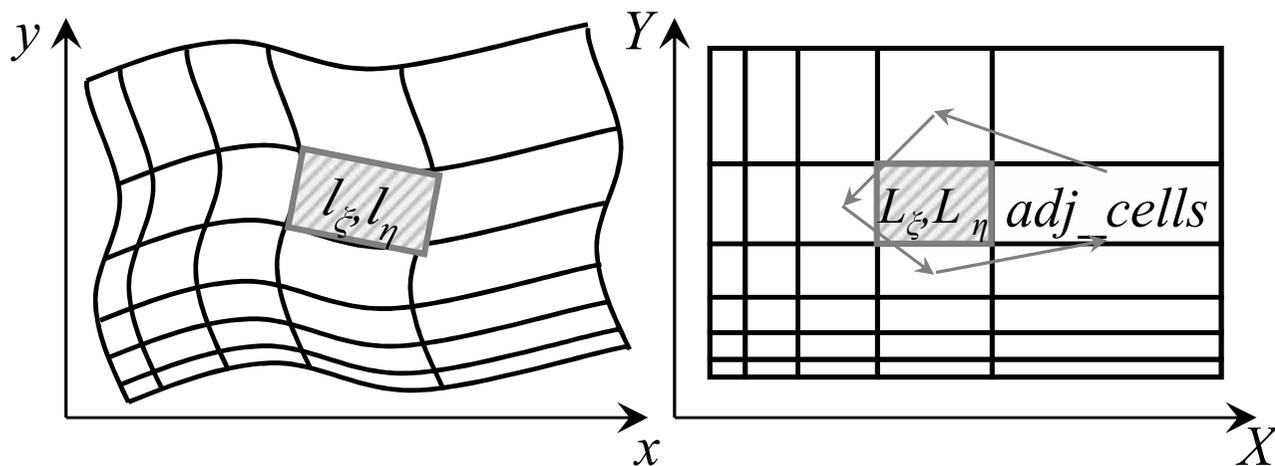
$$\forall j: \sum_i L_{\xi,ij} = \sum_i l_{\xi,ij}, \forall i: \sum_j L_{\eta,ij} = \sum_j l_{\eta,ij},$$

$f$  – 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.

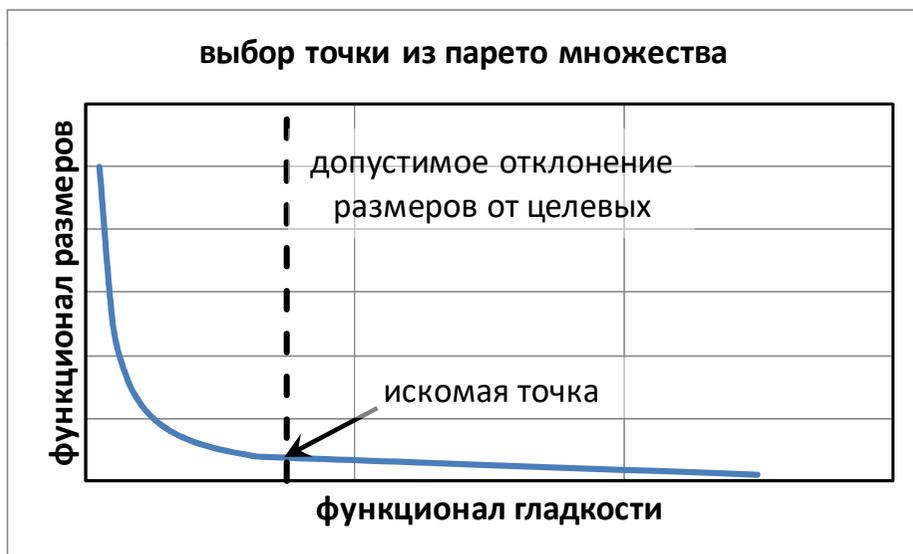
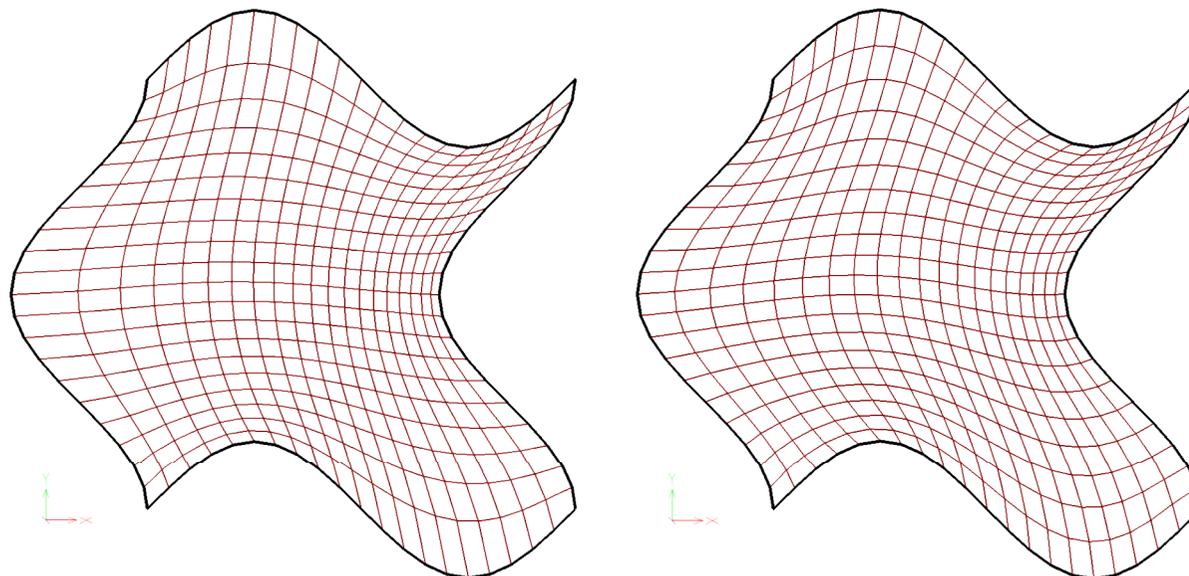


# Комбинирование функционалов



## Варианты:

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



функционал гладкости: обобщенный функционал:

$$J = E \rightarrow \min$$

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

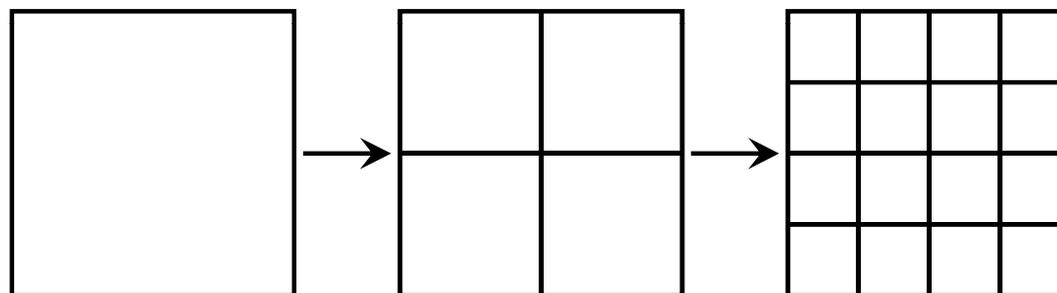
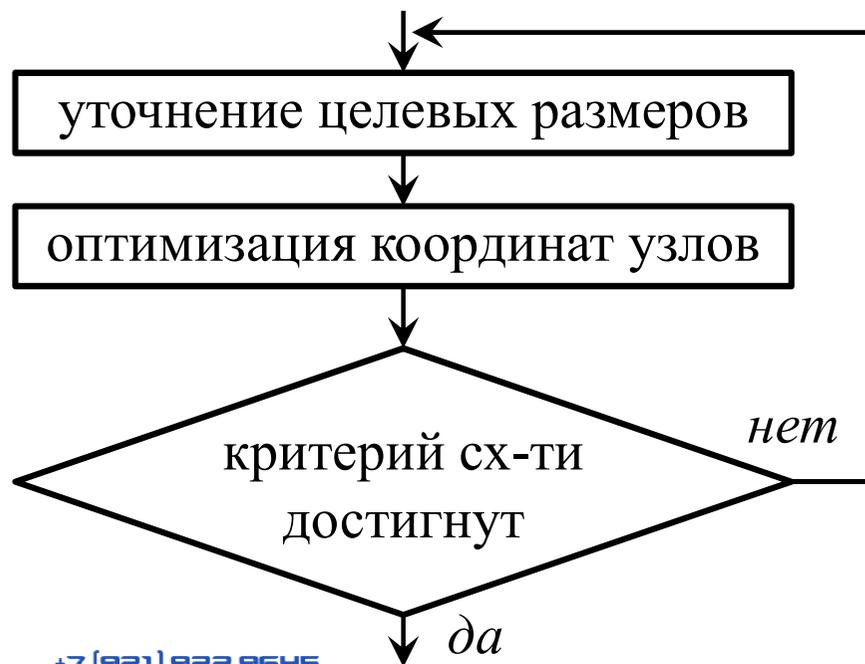
$$S = \sum_{n=1}^{N_{edges}} f(edge_n, L_n),$$

$f$  – 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.

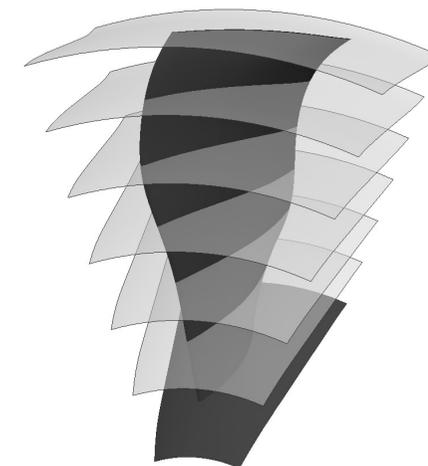
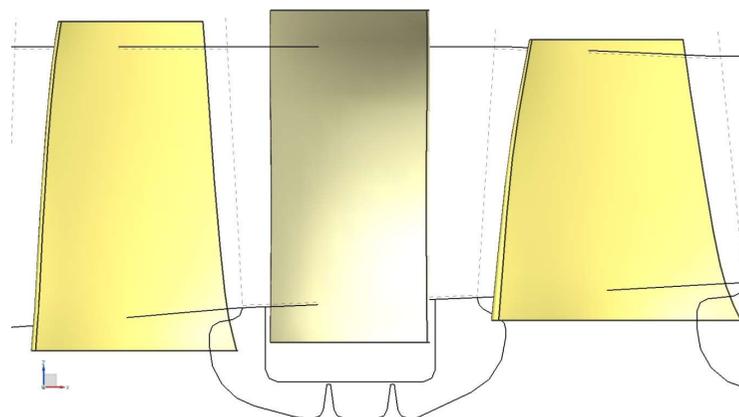
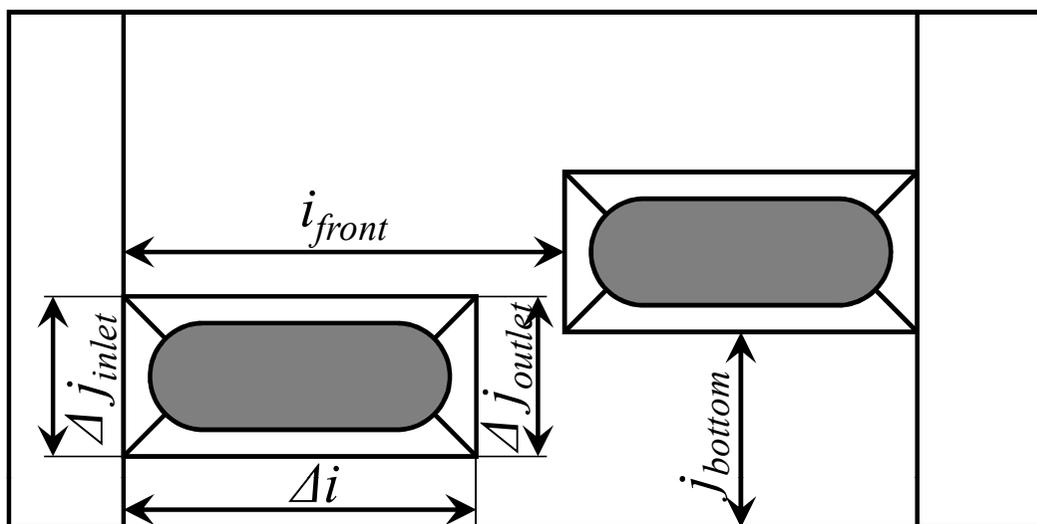


# TurboR&D.Mesher, шаблон для межлопаточных каналов



## Многоблочная расчетная сетка:

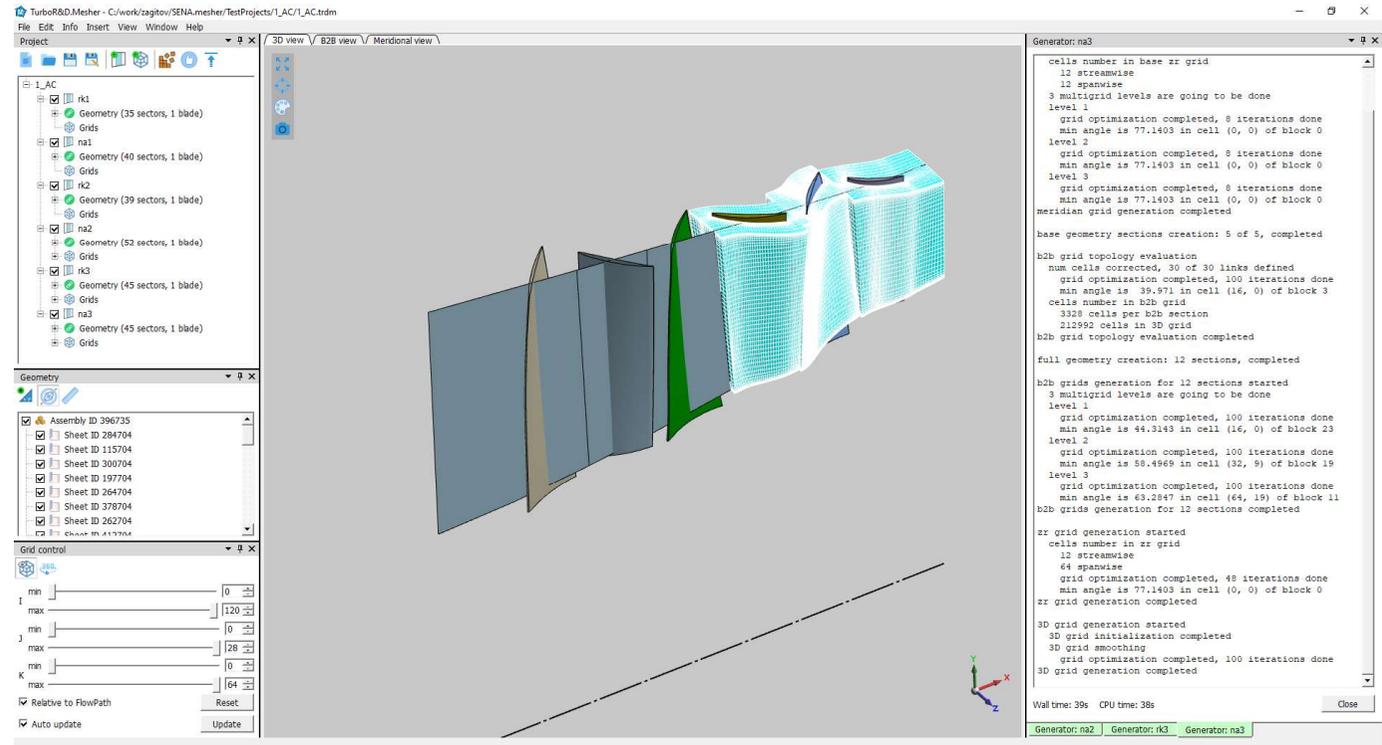
1. Н-блок с вырезами для лопаток,
2. О-блоки вокруг лопаток для реализации сгущения и локализации особенностей (радиальные зазоры, галтели и т.п.),
3. Н-блоки на входе и выходе для обособленного 2D-блокинга притрактовых полостей.



# 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.



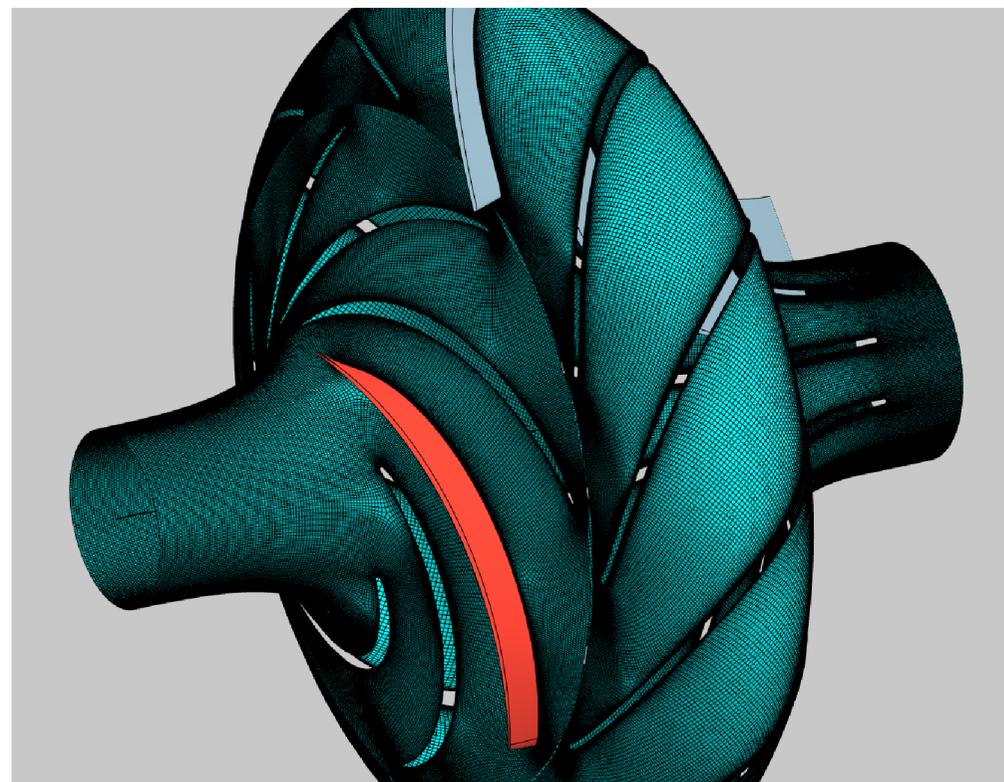
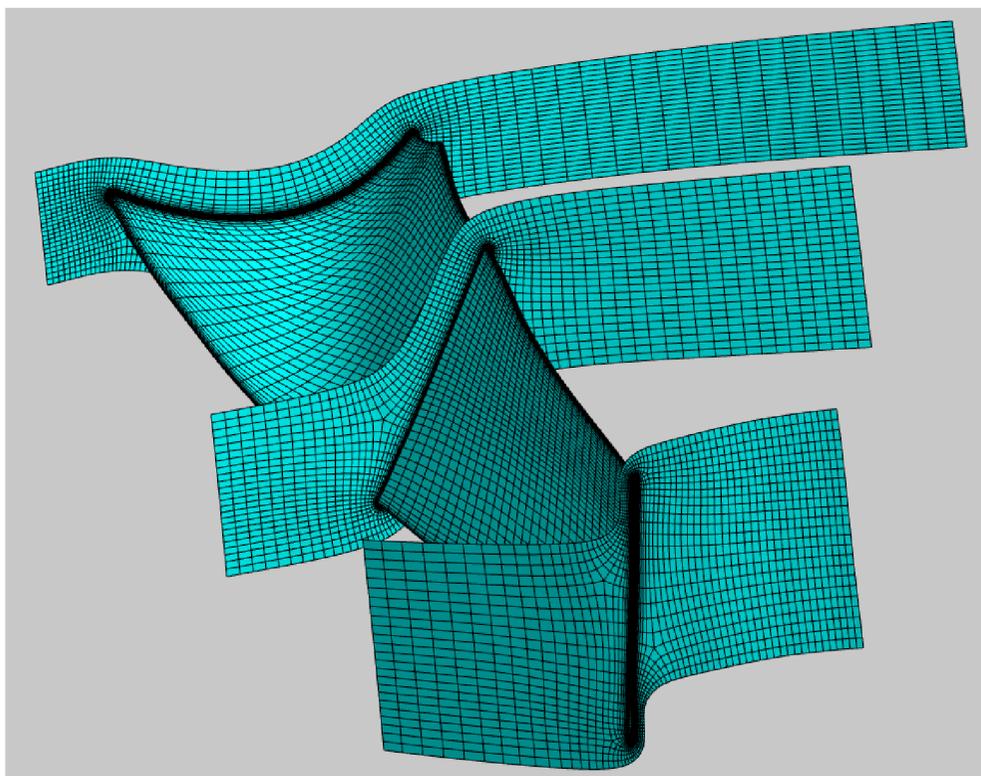
- Разработана документация с пошаговыми примерами.
- Программа полностью отчуждаемая.

## Тестирование TurboR&D.Mesher v 1.1.5



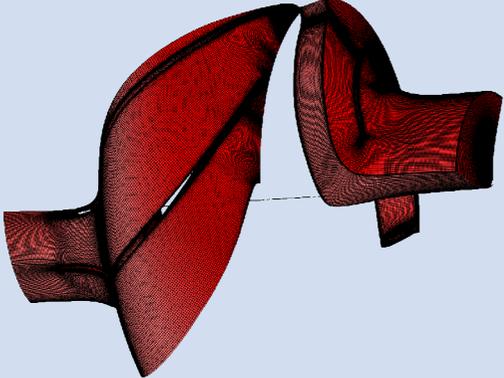
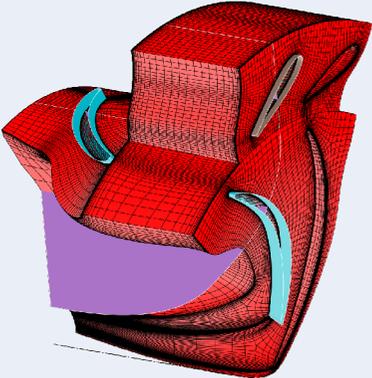
- 68 тестовых геометрий,
- 14 вариантов плотности сетки,
- с учетом зазоров и без.

**Итого: 1904 тестовых случая**



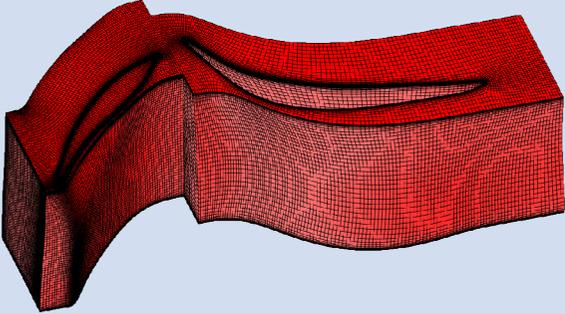
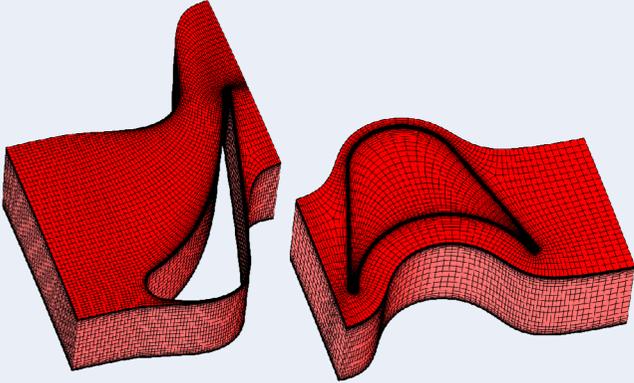
## Сравнительный анализ



	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°

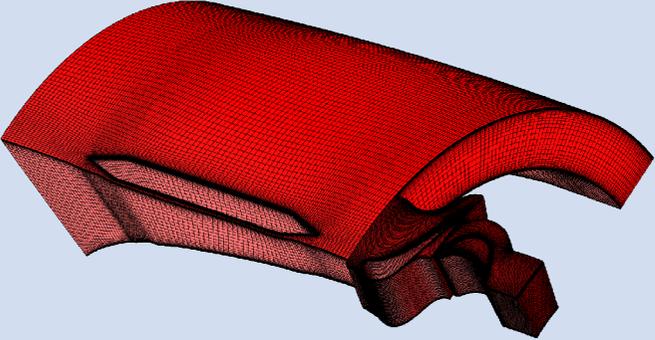
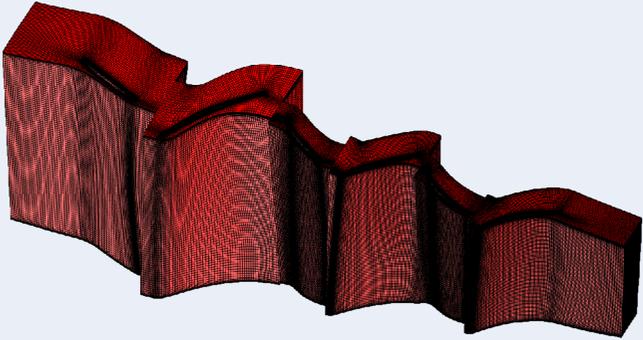
## Сравнительный анализ



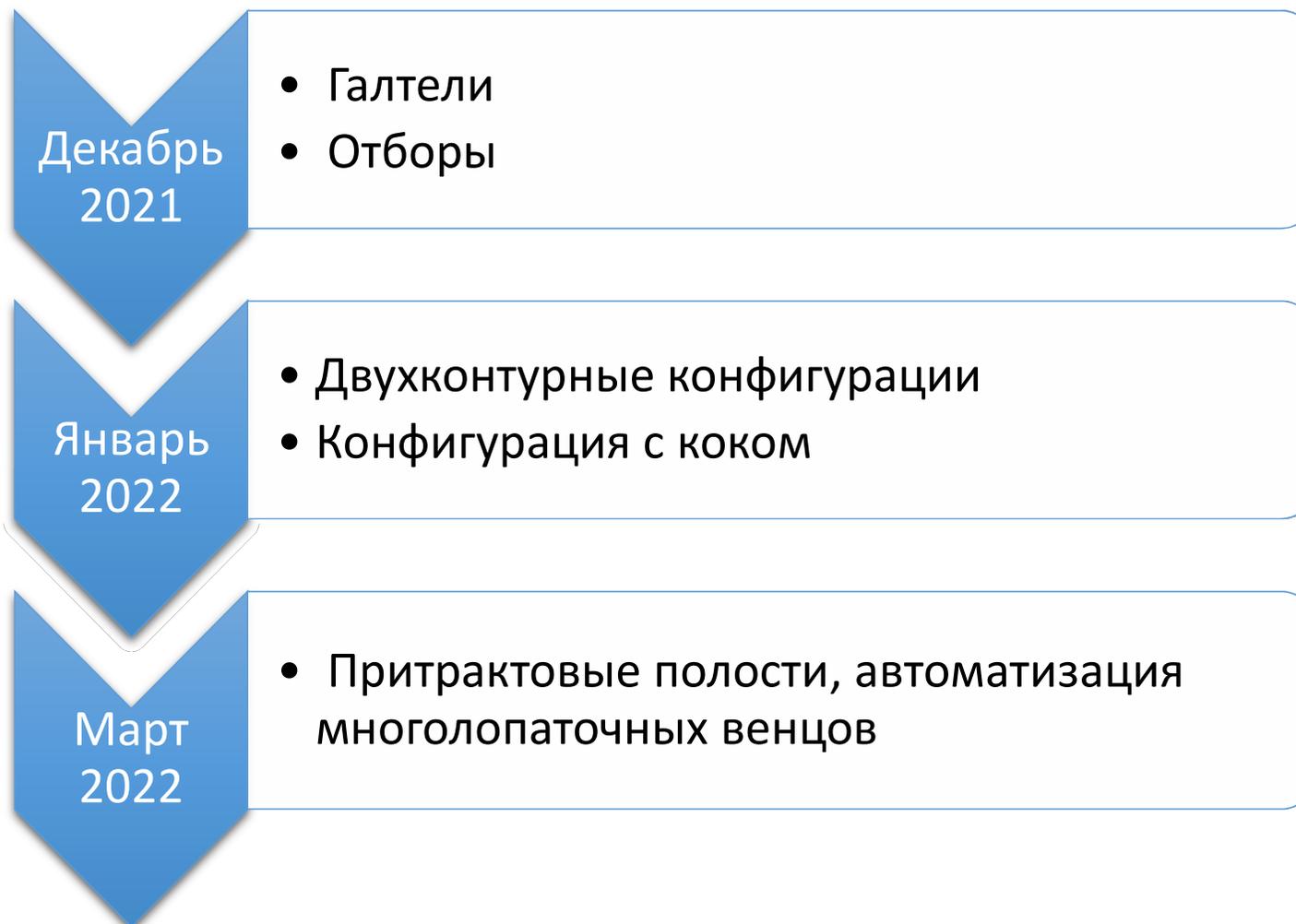
	AutoGrid5	TurboR&D
	Row 1 (зазор): 43.3° Row 2: 45.4°	Row 1 (зазор): 55.0° Row 2: 48°
	Row 1: 38.9° Row 2 (зазор): 24.9°	Row 1: 52.4° Row 2 (зазор): 55.3°

## 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°

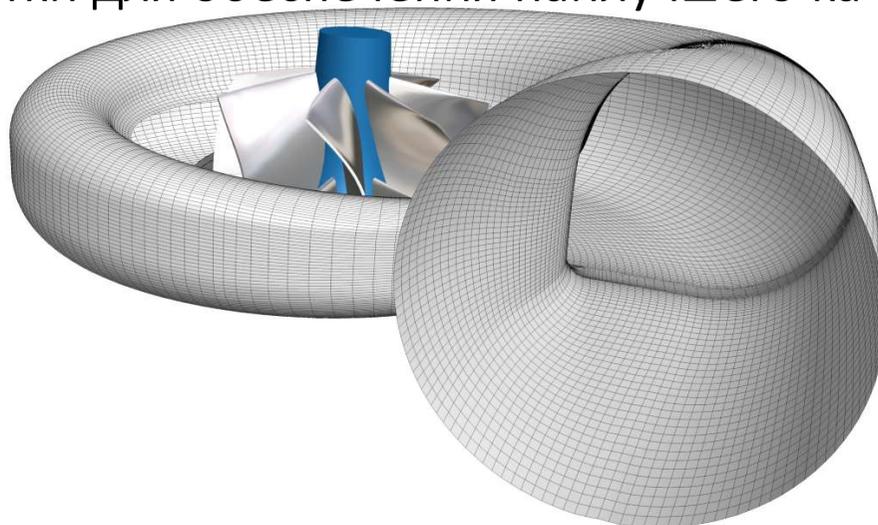
## План разработки, TurboR&D.Mesher

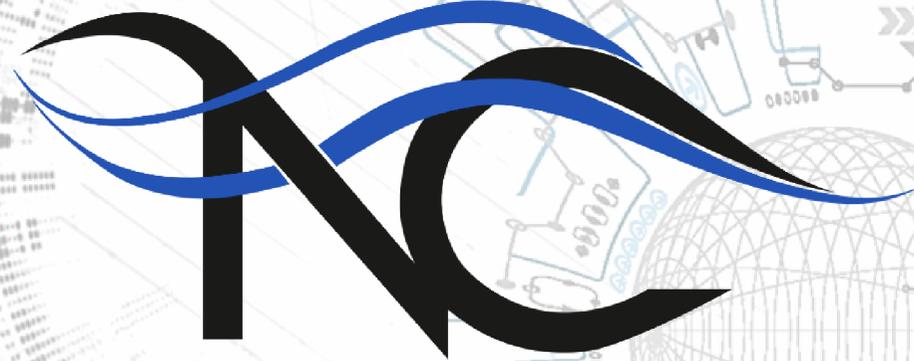


## План разработки, универсальный многоблочный сеточник



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!**