



26-27 сентября 2022 г.

# Supercomputer simulations of turbomachinery problems with higher accuracy on unstructured meshes

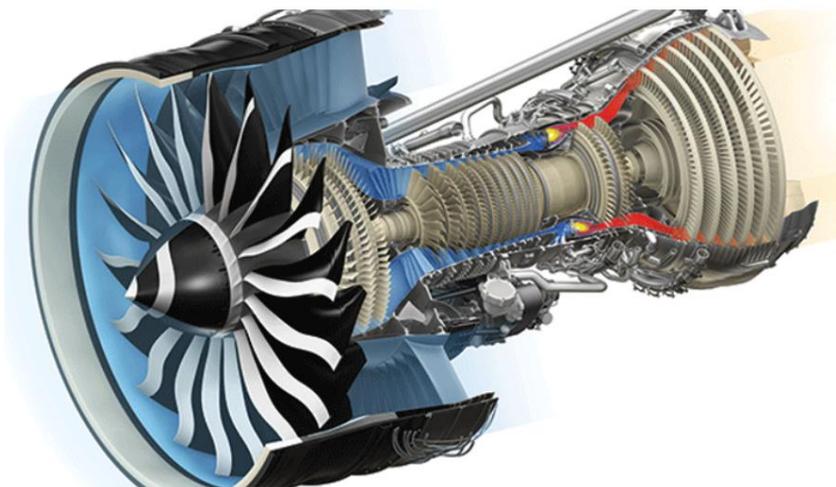


Алексей Дубень<sup>1</sup>, Андрей Горобец<sup>1</sup>, Сергей Суков<sup>1</sup>,  
Ольга Маракуева<sup>1,2</sup>, Николай Шуваев<sup>1,2</sup>, Ренат Загитов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва

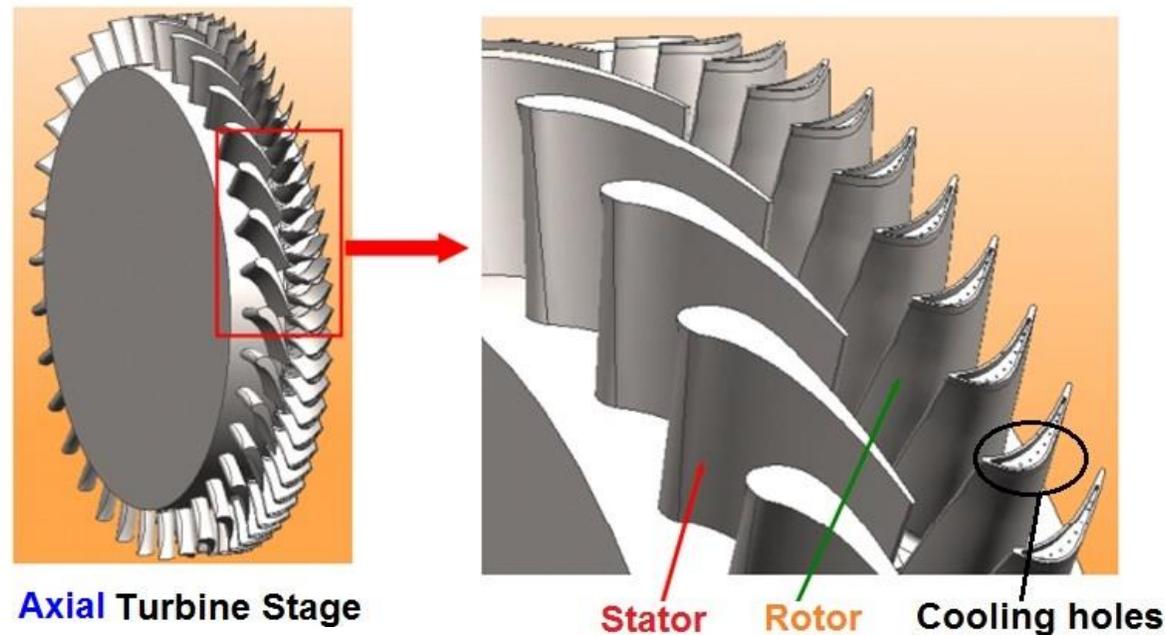
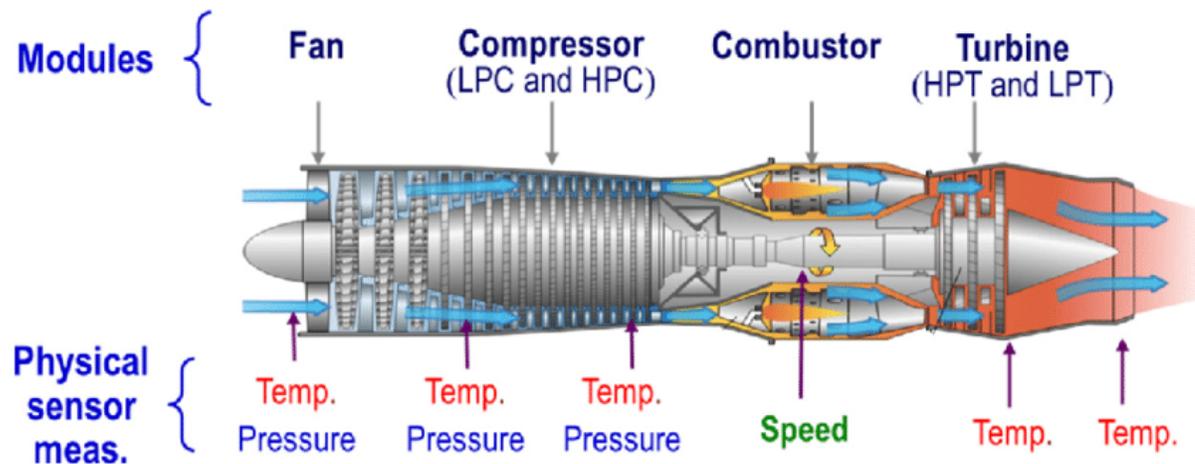
<sup>2</sup>Инженерный центр численных исследований, г. Санкт-Петербург

# Введение: турбомашины



Турбореактивный двигатель

- Множество ступеней (статор+ротор)
- Большое и разное количество лопаток на венце (статор или ротор)
- Множество дополнительных устройств



Ступень осевой турбины

# Введение: моделирование течения в турбомашинах

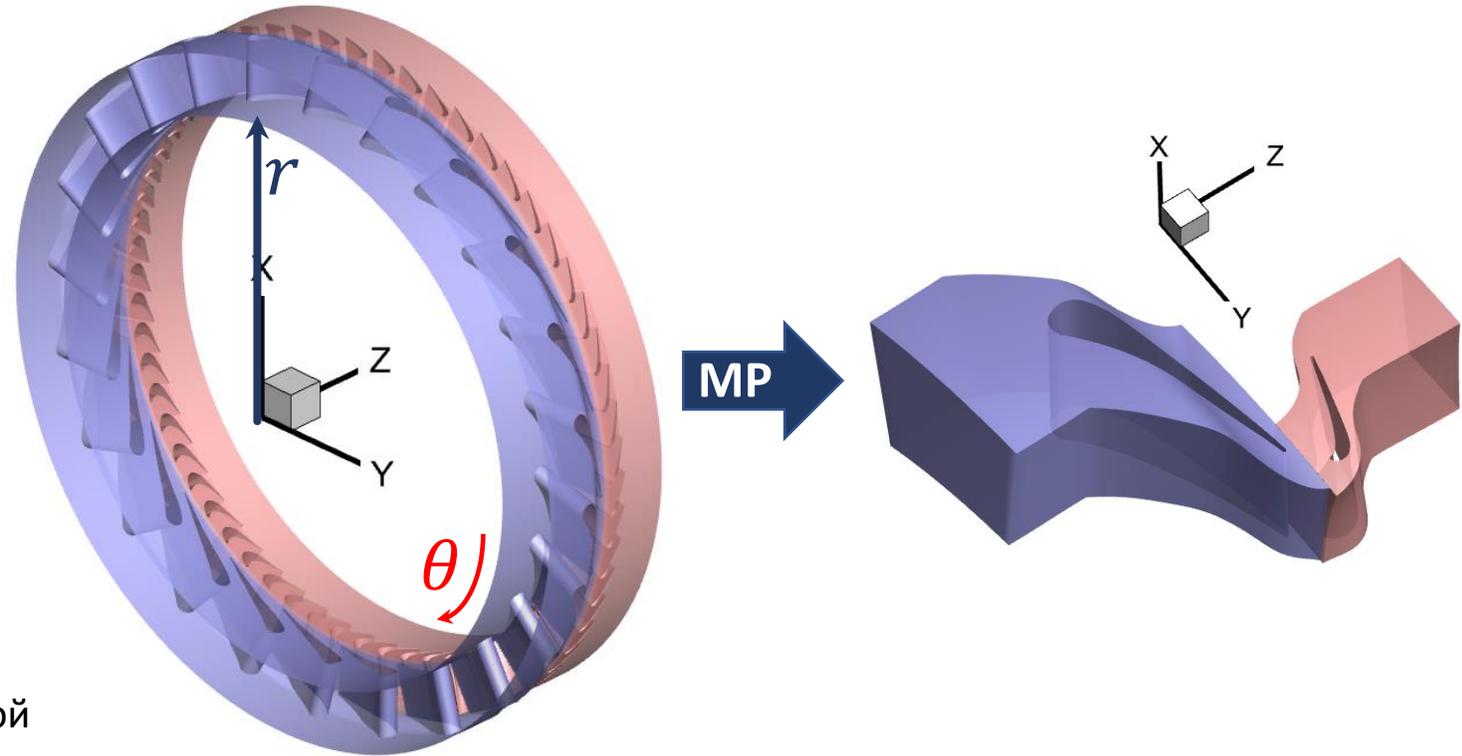


- Лопаточные венцы, вращающиеся друг относительно друга, расположены очень близко (5-50% от хорды лопатки)
  - течение носит принципиально нестационарный характер
  - взаимодействие венцов может быть значительным
- Для оценки основных аэродинамических характеристик узлов (массовый расход  $G$ , степень повышения полного давления  $\pi$ , КПД  $\eta$ ), как правило, достаточно учета только стационарной части взаимодействия венцов
- Для этих целей разработана технология «поверхности смешения» (Mixing Plane, MP)
  - интерфейс между венцами MP предполагает отсутствие окружной неравномерности потока в одном венце при определении характеристик другого венца
  - происходит согласование радиальных распределений параметров потока между соседними ротором и статором

# Поверхность смешения (Mixing Plane, MP)



- MP приводит к существенной экономии вычислительных ресурсов
  - для расчетов задействуется только один межлопаточный канал (сектор периодичности лопаточного колеса) на венец
  - в окружном направлении – условия периодичности
- MP – ключевой элемент для моделирования турбомашин в коммерческих кодах (NUMECA Fine/Turb, ANSYS CFX)
  - главный недостаток – использования схем низкой точности (2-го порядка)
- Цель работы – разработка и эффективная реализация технологии MP в рамках кода NOISEtte
  - работающего на неструктурированных сетках
  - основанного на схемах повышенной точности

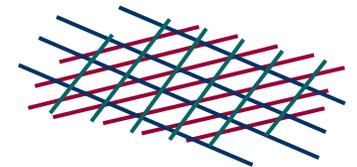
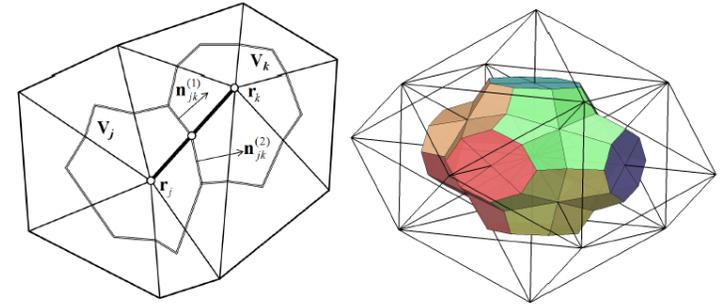


- Требования к MP
  - консервативность
  - неотражаемость (слабая отражаемость)

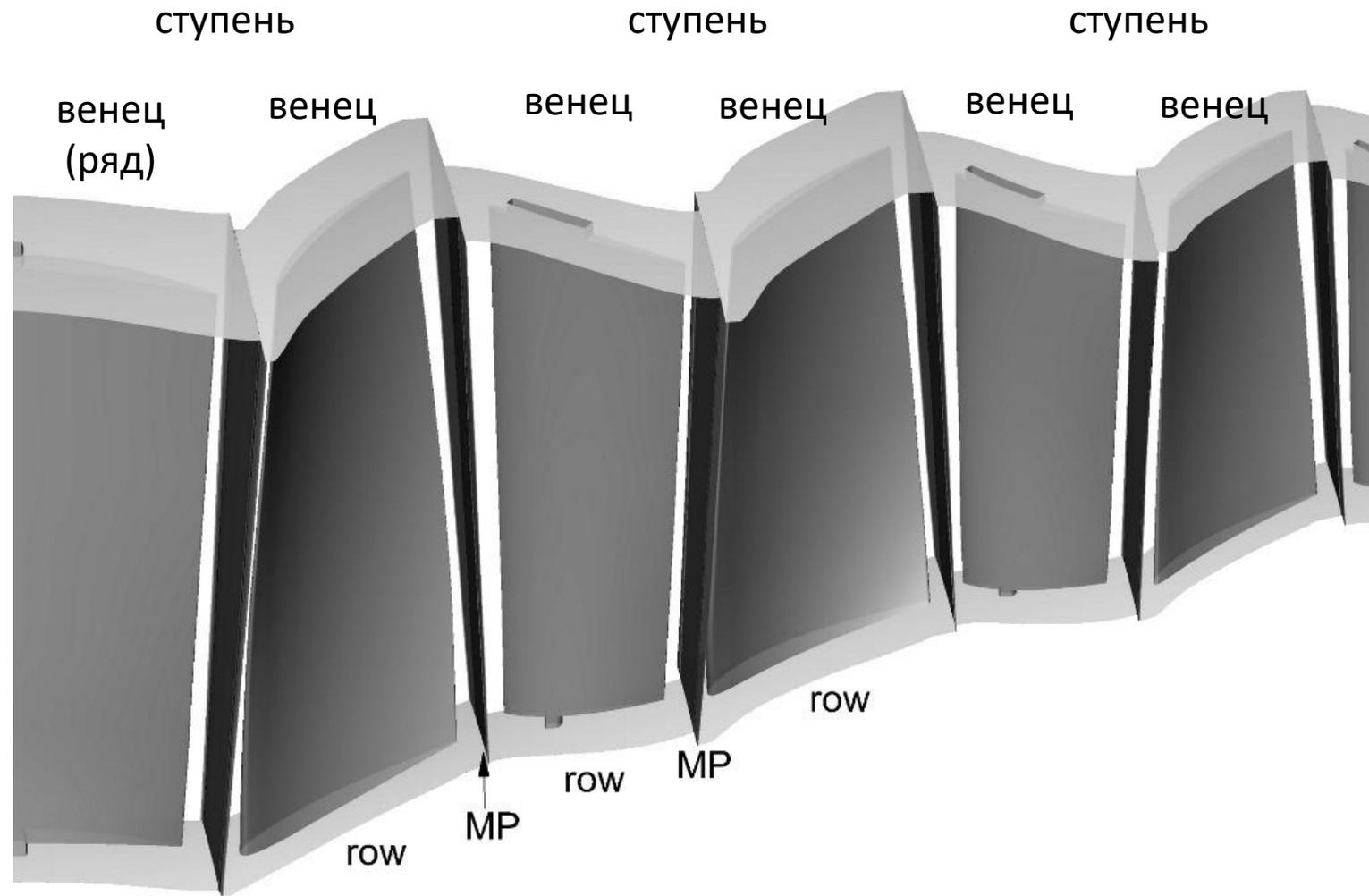
# CFD код NOISEtte



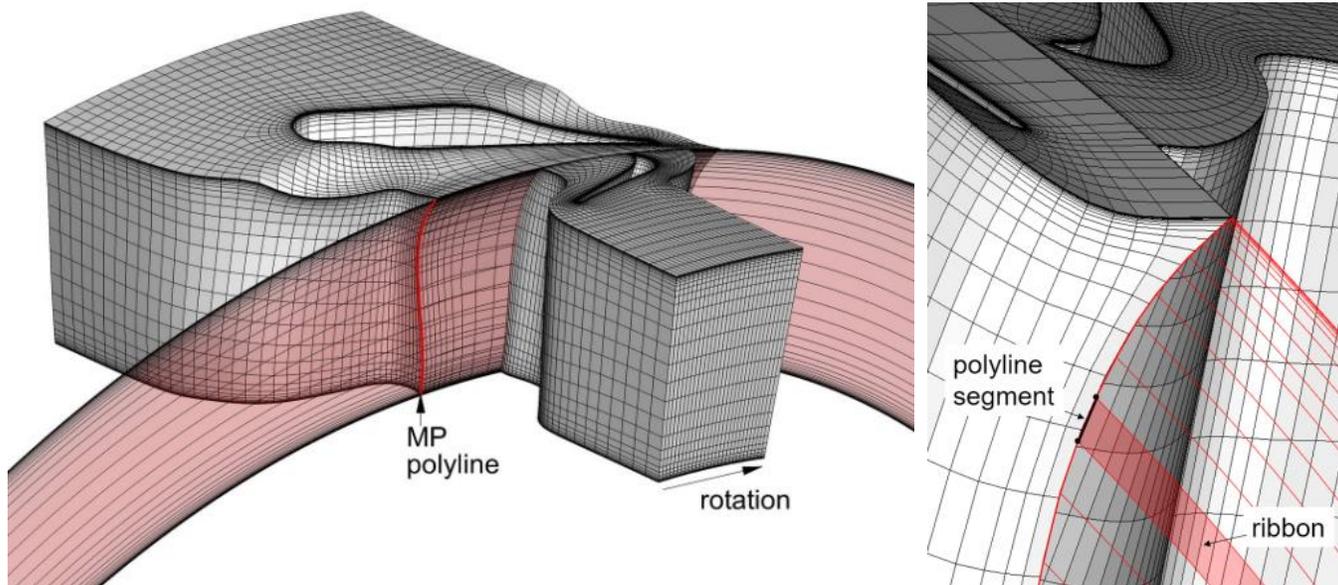
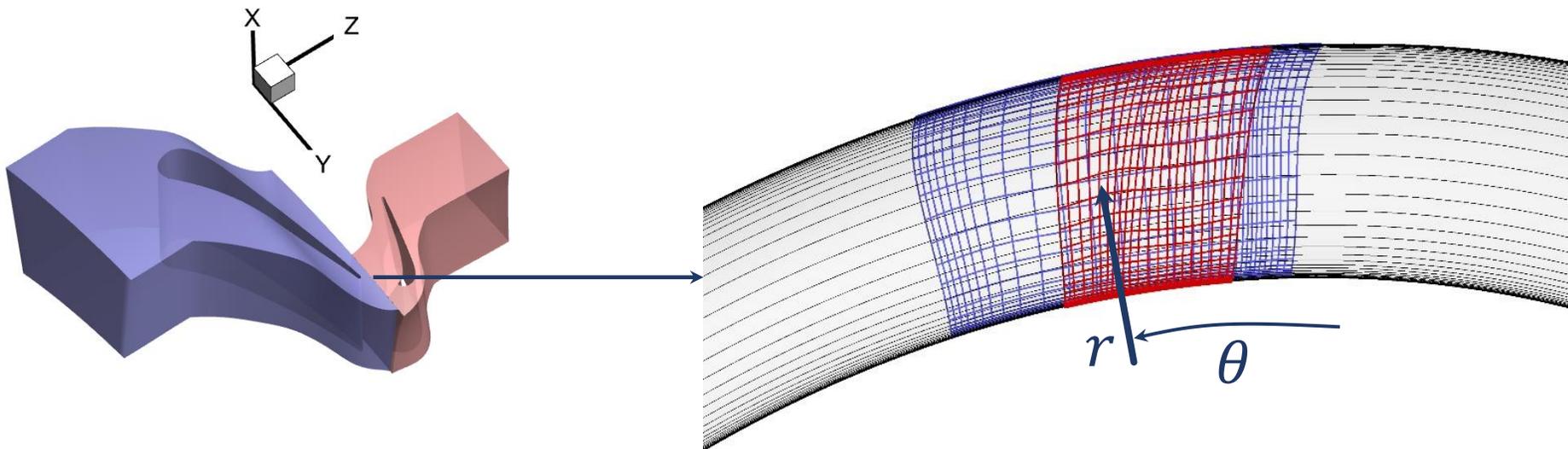
- Решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для идеального сжимаемого газа (стационарный RANS подход)
  - модели турбулентности Спалартра-Алмараса (SA) и Ментера (SST)
- Неструктурированные сетки (тетраэдры, пирамиды, призмы, гексаэдры)
- Конечно-объемная вершинно-центрированная схема
- EBR схема повышенной точности для конвективных потоков
  - 2-й порядок на произвольных неструктурированных сетках
  - вплоть до 5-го порядка на сетках типа равномерных решеток (трансляционно-инвариантные сетки)
- Интегрирование по времени – неявный метод ньютоновских итераций 1-го порядка
  - солвер BiCGSTAB с предобуславливателем (SGS, CSGS, ILU0)
- Параллельный алгоритм – многоуровневое MPI+OpenMP+OpenCL распараллеливание
  - задействование до  $\sim 10^5$  CPU ядер, до  $\sim 100$  GPU без ощутимой потери эффективности



# Турбомашины (турбины и компрессоры)



# Реализация технологии МР в NOISEtte



- Поверхность смещения (МР) – поверхность вращения ломаной вокруг оси (z), определяемая координатами (z,r)
  - каждый сегмент – полоса (лента)

Поверхность вращения на примере одноступенчатой осевой турбины

# Реализация технологии MP в NOISEtte



## Построение MP:

1. построение ломаной по имеющимся узлам
2. нахождение пересечений MP со следом контрольного объема (CV) граничных узлов

- Требования к MP:

- минимальное число узлов
- сохранение сеточного разрешения по обе стороны от интерфейса

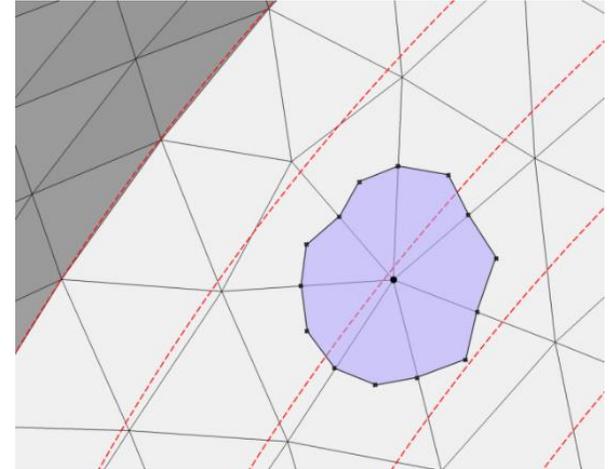
- MP – одна на интерфейс

- Каждый след CV дробится на пересечения с различными полосами

- каждый след CV знает список полос, с которыми пересекается
- каждая полоса знает список следов CV, которые она пересекает

## Алгоритм работы технологии MP (на каждом временной итерации)

1. Осреднение переменных и потоков в граничных узлах по полосам для каждого из сопрягаемых доменов
  - используется переход из декартовой в цилиндрическую систему координат  $(x, y, z) \rightarrow (z, r, \theta)$
2. Вычисление локальных потоков на интерфейсе с использованием осредненных значений
  - используется солвер Роу для решения задачи Римана о распаде разрыва



# Особенности параллельной реализации MP в NOISEtte



- В отличие от вихреразрешающих расчетов, RANS расчеты не требуют очень больших вычислительных сеток
  - Расчеты должны выполняться быстро, с минимальными вычислительными затратами
  - Должно получаться «хорошо сошедшееся» решение
- Число узлов на интерфейсах – на порядок меньше, чем общее число узлов в сетке
- Распараллеливание процесса осреднения по полосам на MP
  - в рамках OpenMP распараллеливания циклов для каждого процесса MPI
  - MPI\_Allreduce для всех, у кого есть интерфейсные узлы
- При использовании GPU расчеты, связанные с MP, производятся на хосте
  - все необходимые данные передаются с GPU на хост
  - производятся вычисления, связанные с работой MP
  - результирующие потоки в интерфейсных узлах передаются на GPU

# Тестирование МР: осевая одноступенчатая турбина (1/2)



Совершенный газ:  
( $C_p$  - const,  $\gamma$  - const)  
Модель турбулентности SST  
RPM = 12770.3 мин<sup>-1</sup>  
Статор: 24 лопатки  
Ротор: 59 лопаток

**ГУ на входе:**

$P_0 = 310$  кПа

$T_0 = 400$  К

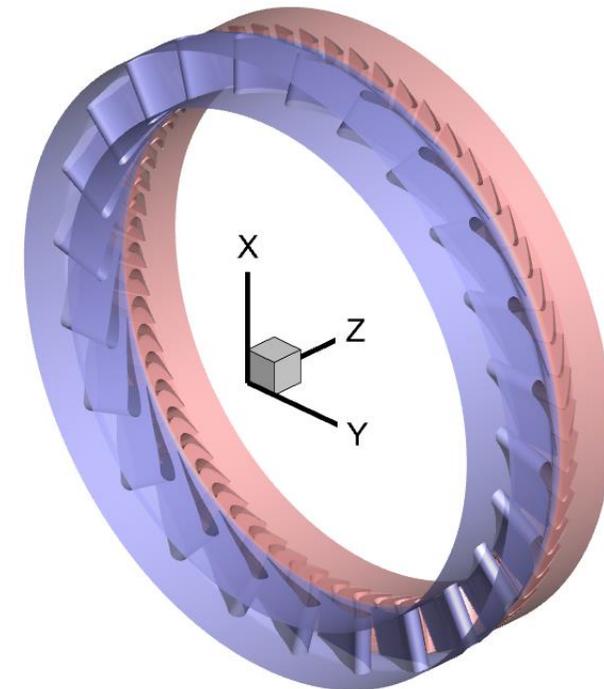
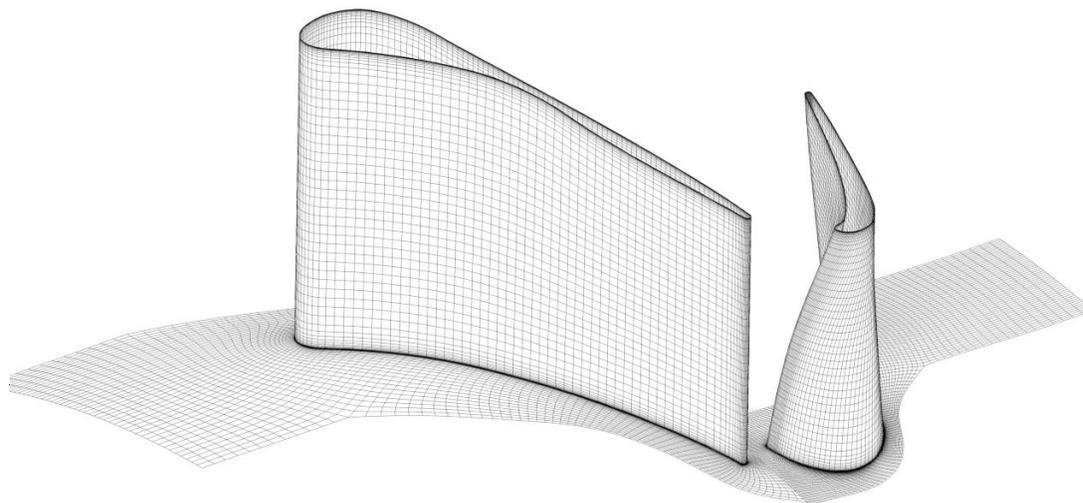
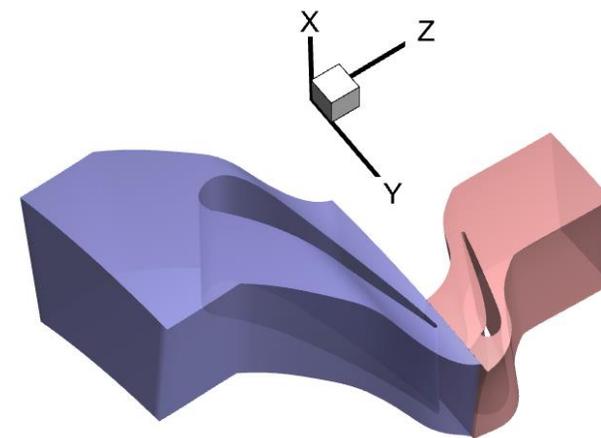
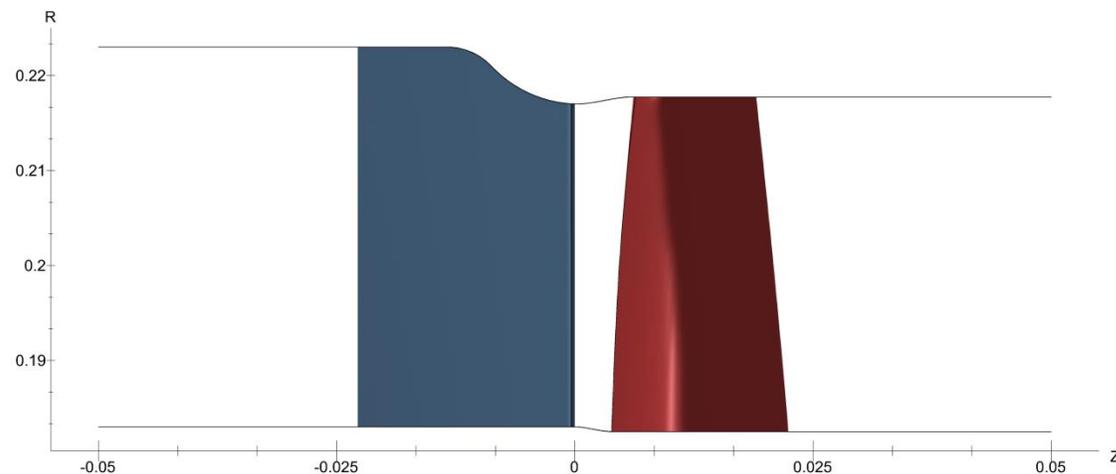
Интенсивность турб.:  $Tu = 8$ -  
10%

$V_z / |V| = 1$

**ГУ на выходе:**

$P_2 = 65.8$  кПа

**Сетка:** 1.1 млн



# Тестирование МР: осевая одноступенчатая турбина (2/2)

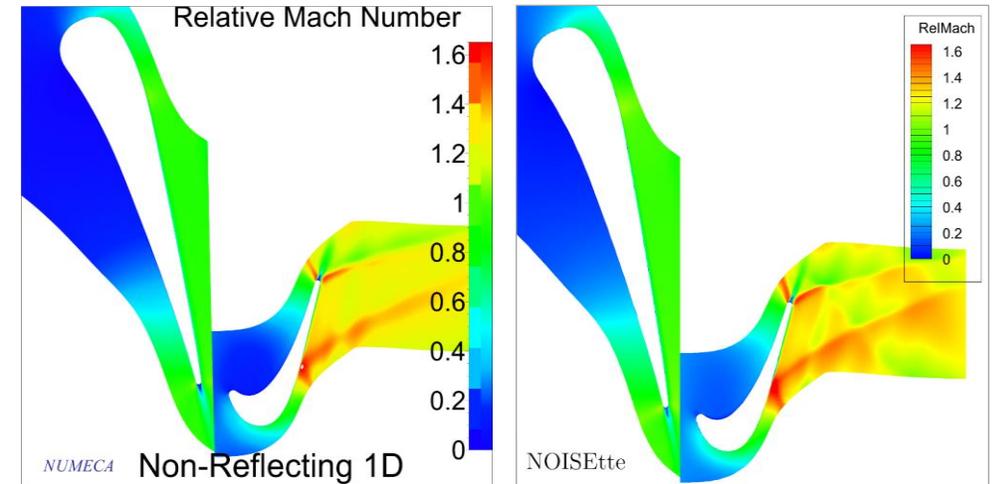


	$G, \text{Kg/s}$	$\pi^*$	$\eta^*, \%$
Experiment	4.07	-	-
NUMECA	4.20	3.94	89.9
NOISEtte	4.21	3.94	90.01

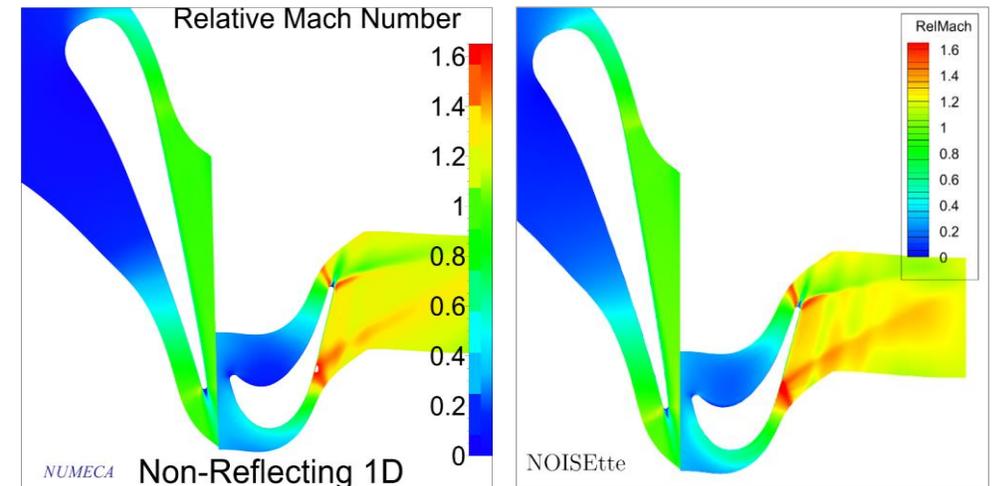
Интегральные характеристики

Equipment	Code	Time, s
Two 24-core Intel Xeon Platinum 8268	NUMECA (MPI)	120
Two 16-core Intel Xeon Gold 5218	NOISEtte (MPI+OpenMP)	220
GPU NVIDIA A5000	NOISEtte (OpenCL)	130

Плоское среднее сечение



Плоское привтулочное сечение



# Тестирование МР: 1-я ступень осевого компрессора



Совершенный газ:  
( $C_p$ - const,  $\gamma$  - const)  
Модель турбулентности SST  
RPM = 15 000 мин<sup>-1</sup>  
Радиальный зазор РК 0.3 мм

Входной направляющий  
аппарат: 38 лопаток  
Ротор: 25 лопаток  
Статор: 40 лопаток

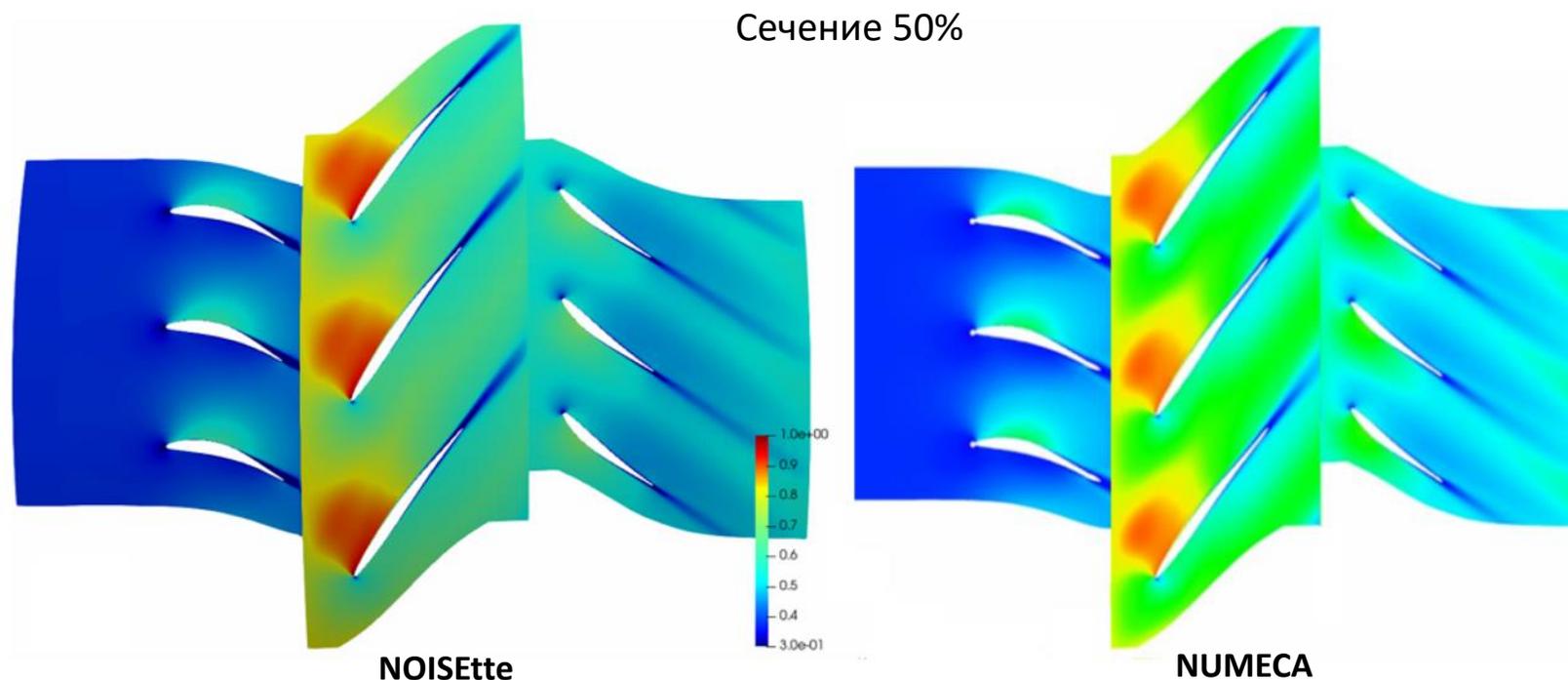
## ГУ на входе:

$P_0 = 101$  кПа  
 $T_0 = 288$  К  
 $V_z / |V| = 1$

## ГУ на выходе:

$P_2 = 106$  кПа

Сетка: 1.24 млн ячеек



	$G, \text{Kg/s}$	$\pi^*$	$\eta^*, \%$
NOISEtte	11.6	1.25	91.36
NUMECA	11.74	1.25	91.67

Интегральные характеристики

# Тестирование МР: Rotor67 (1/2)



Совершенный газ:

( $C_p$  - const,  $\gamma$  - const)

Модель турбулентности: SST

RPM = 16 043 мин<sup>-1</sup>

Радиальный зазор 0.1016 мм

Ротор: 22 лопатки

**ГУ на входе:**

$P_0 = 101$  кПа

$T_0 = 288$  К

$V_z / |V| = 1$

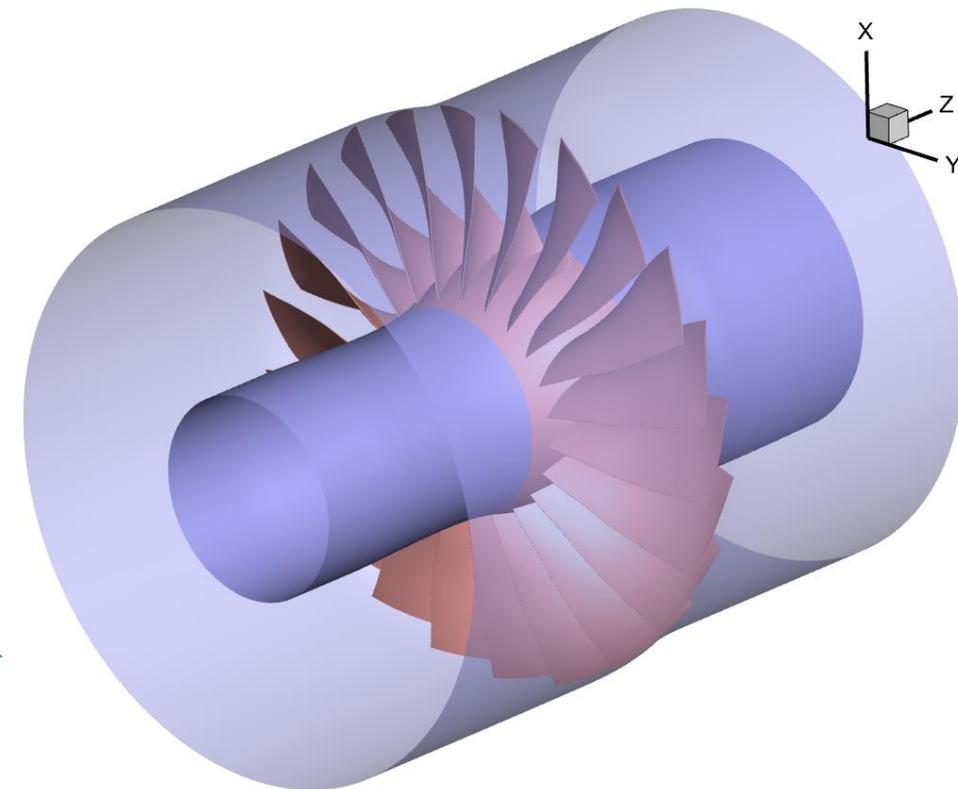
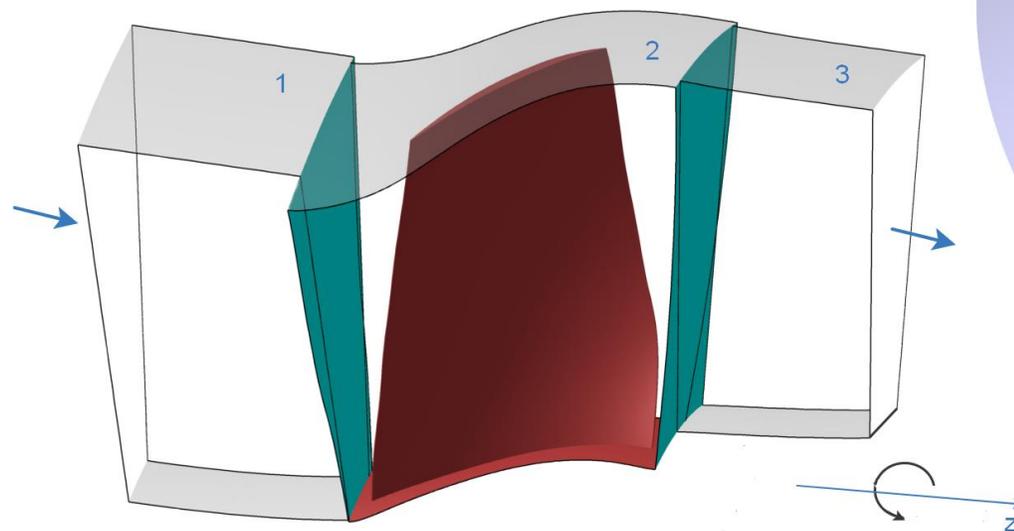
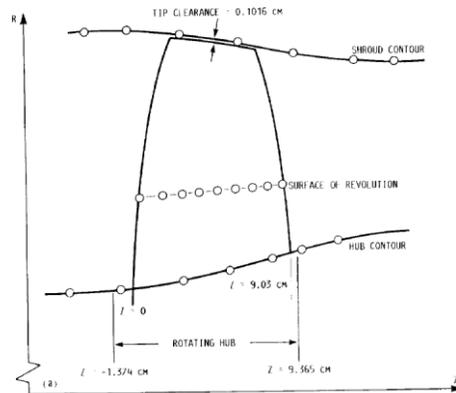
**ГУ на выходе:**

Варьирование  $P_2$  или  
массового расхода  $G$

Сетка: 3 млн. узлов

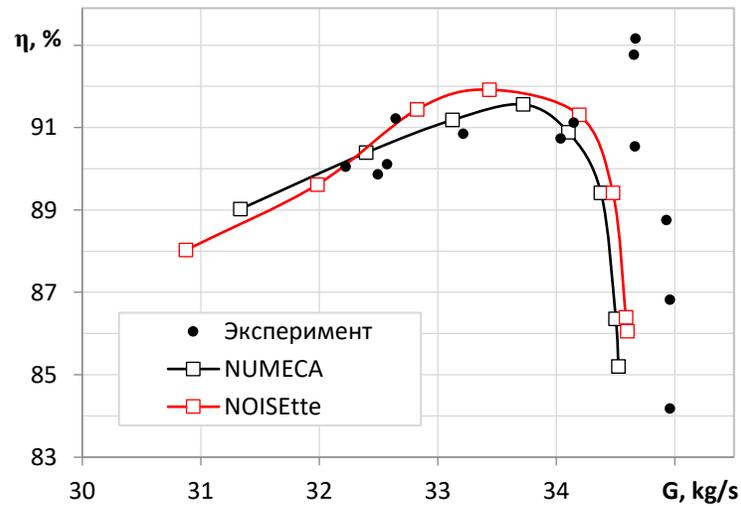
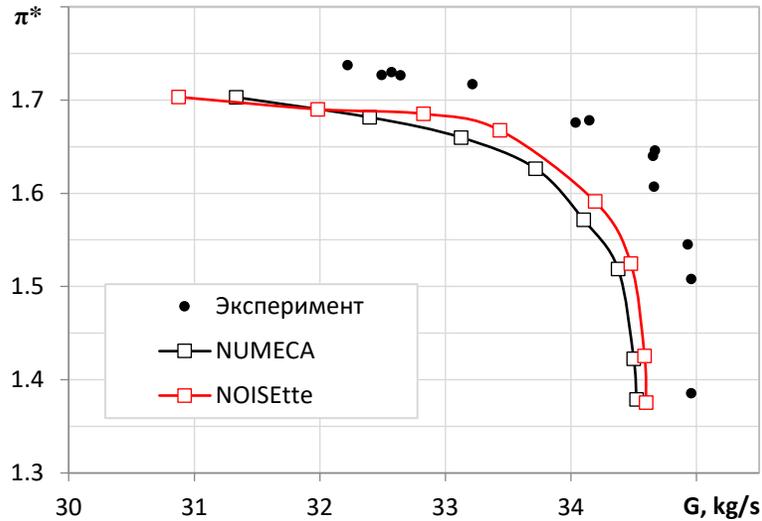
**Эксперимент:**

[Strazisar et al., 1989]



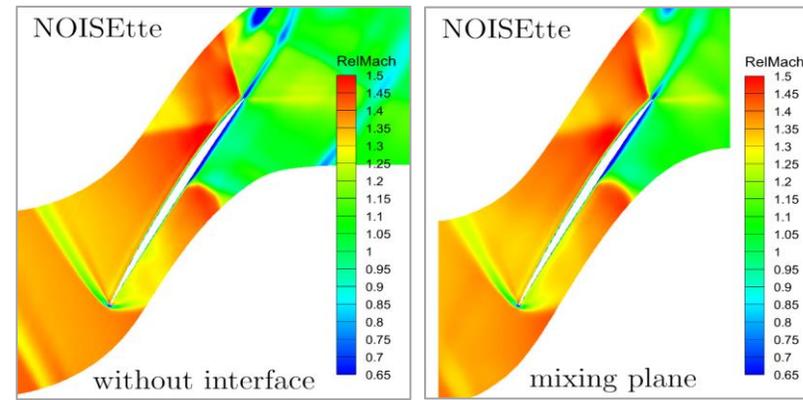
\*Strazisar A.J., Wood J.R., Hathaway M.D., Suder K.L. Laser anemometer measurements in a transonic axial-flow fan rotor // National Aeronautics and Administration, Langley research center. Hampton. Virginia. NASA. TP-2879. 1989. 214 p

# Тестирование МР: Rotor67 (2/2)

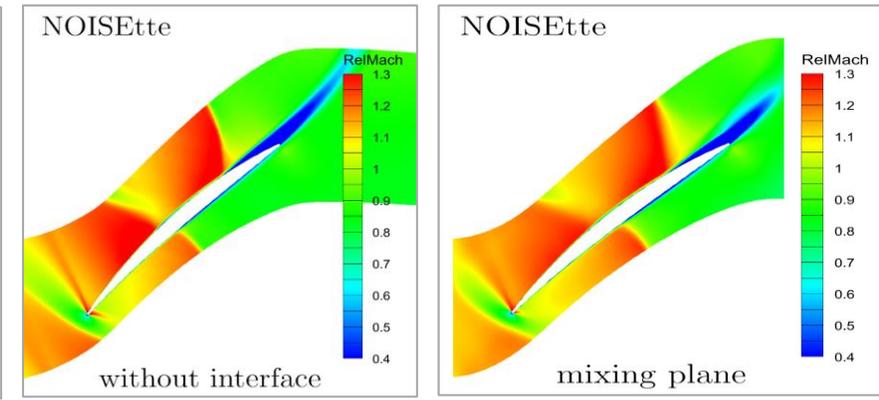


Интегральные характеристики (напорные дуги)

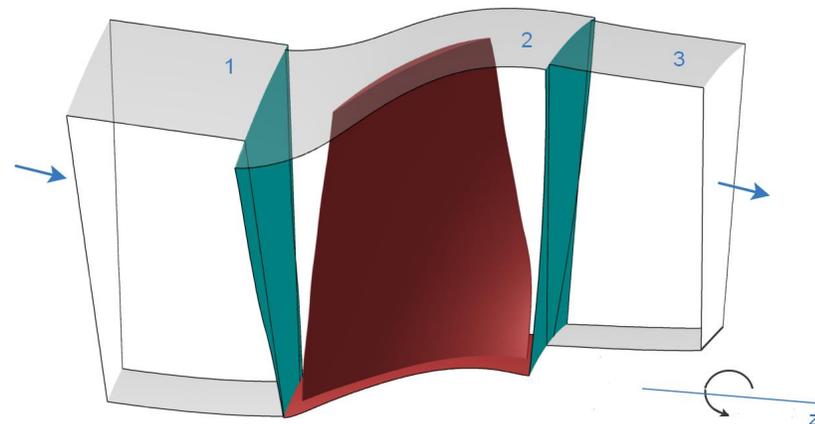
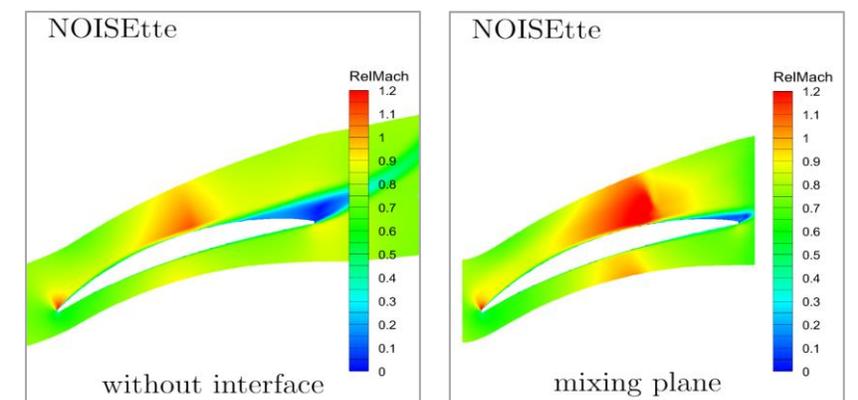
Плоское сечение у периферии



Плоское среднее сечение



Плоское привтулочное сечение



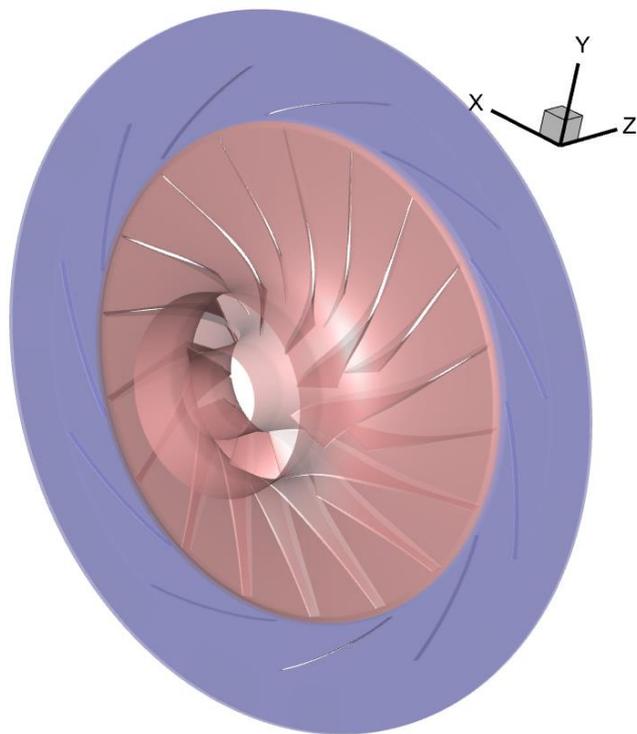
# Тестирование МР: центробежный компрессор



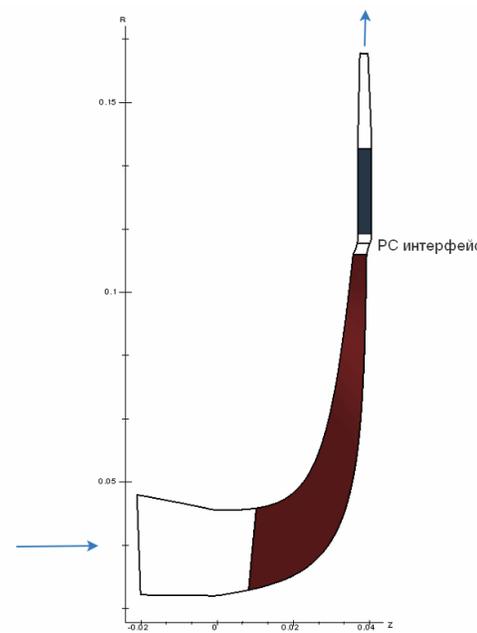
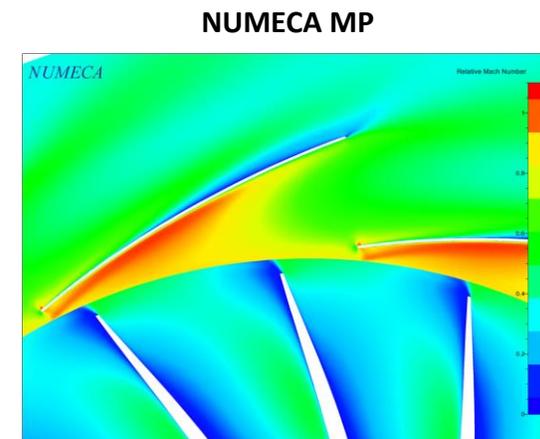
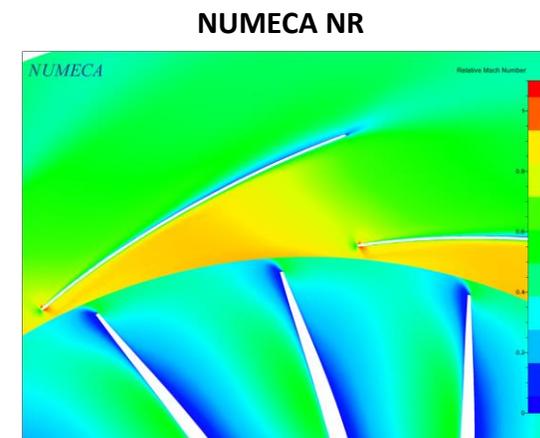
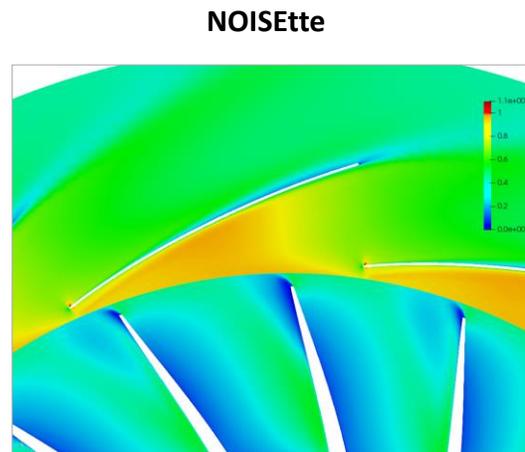
Совершенный газ  
 ( $C_p$  - const,  $\gamma$  - const)  
 Модель турбулентности:  
 SST  
 RPM = 36 000 мин<sup>-1</sup>  
 Сетка 450 тыс.

**ГУ на входе:**  
 $P_0 = 101$  кПа  
 $T_0 = 288$  К  
 $V_z / |V| = 1$

**ГУ на выходе:**  
 $P_2 = 300$  кПа



	$G, \text{Kg/s}$	$\pi^*$	$\eta^*, \%$
NOISEtte	0.501	3.376	85.53
NUMECA MP	0.467	3.287	84.66
NUMECA NR	0.510	3.355	85.46



# Тестирование параллельной эффективности

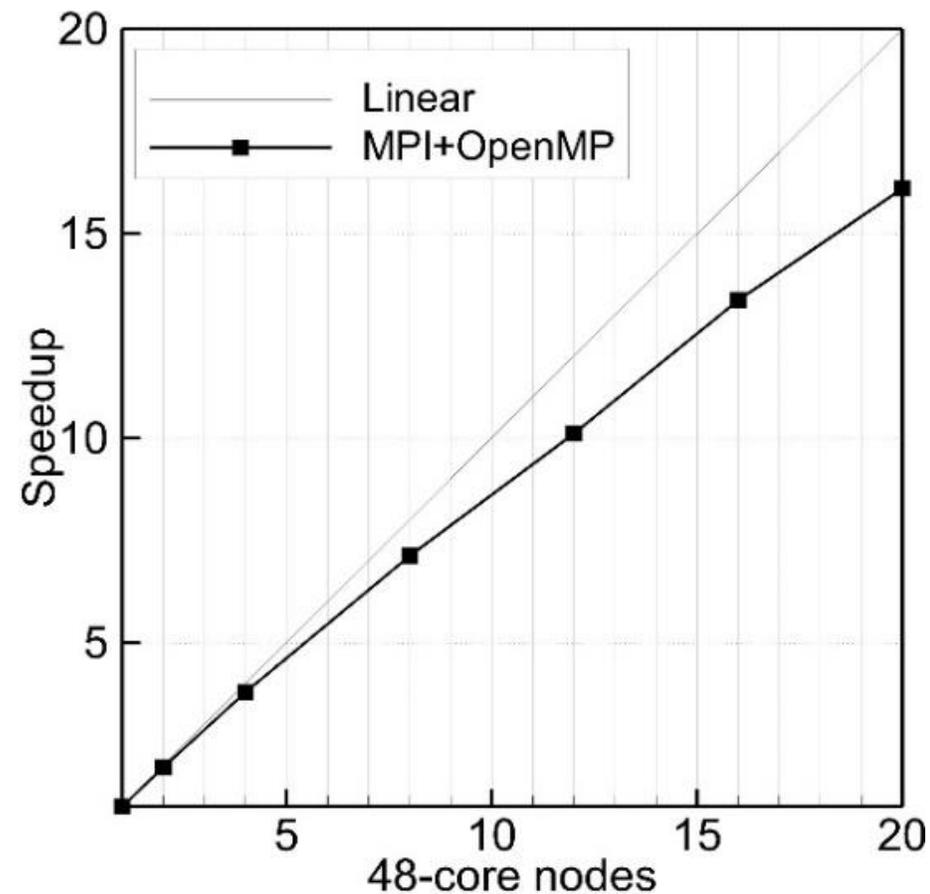
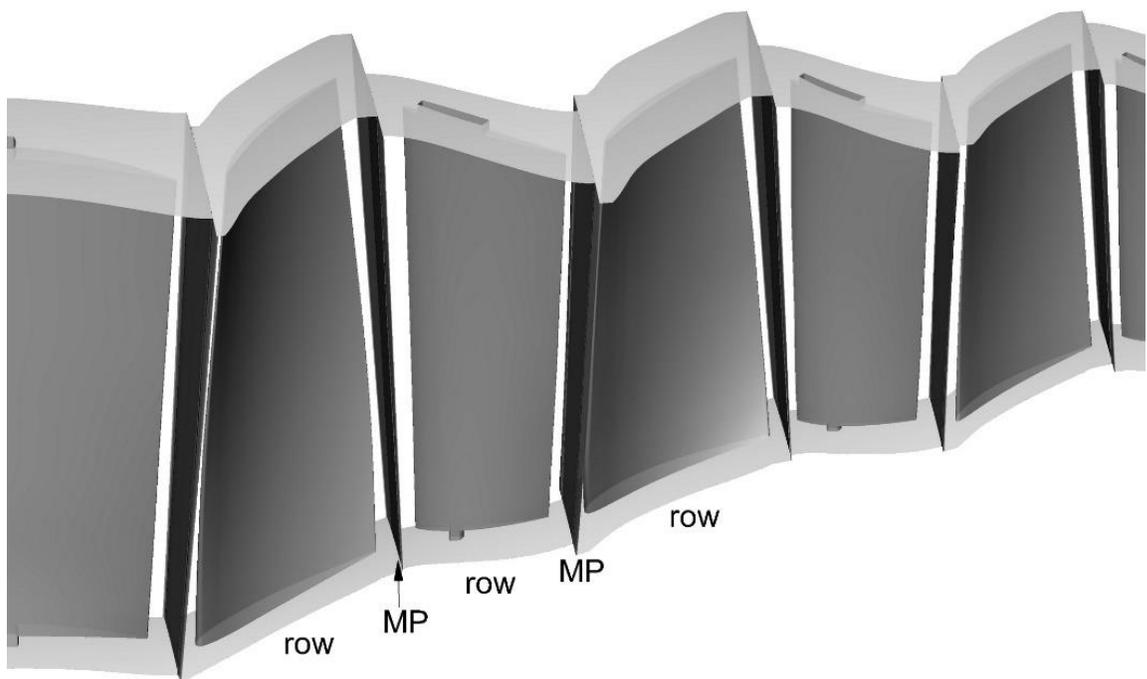


**Задача: 4 ступени 12-ступенчатого компрессора вертолетного двигателя ТВ3-117**

9 венцов  
8 МР интерфейсов

Сетка 12 млн. узлов

- Параллельная конфигурация
  - узлы с 2 CPU Intel Xeon Platinum 24 ядра
  - Intel Omni-Path
  - 2 MPI процесса на узел × 24 OpenMP нити



- Эффективность ~81% при  $10^4$  узлов на ядро
- На 20 узлах МР занимает ~10% от всего времени счета

# Заключение



- Специализированные промышленные приложения требуют реализации дополнительных технологий подобно MP
  - сложная задача для программной архитектуры расчетного газодинамического кода
- Была разработана и реализована в рамках программного комплекса NOISEtte консервативная и слабоотражающая технология MP
  - технология валидирована на ряде задач, характерных для турбомашиностроения, результаты хорошо согласуются с имеющимися эталонными данными (эксперимент, расчеты с помощью специализированного ПО)
  - показана параллельная эффективность ее работы
- Было показано, что
  - даже простой неявный метод интегрирования по времени без какого-либо ускорения сходимости (например, мультигрид) может конкурировать со специализированным коммерческим кодом
  - эффективность параллельного алгоритма очень важна даже для «маленьких» задач
- Проблемы, которые нужно решить
  - Какой выигрыш дает использование схемы повышенной точности для стационарных RANS расчетов?
  - Какие должны быть оптимальные настройки неявной схемы интегрирования по времени и солвера линейной алгебры, чтобы максимально ускорить получение сошедшегося решения при сохранении устойчивости счета?
  - Ускорение сходимости решения (мультигрид)

- 
- Работа выполнена в рамках проекта **РНФ № 21-71-10100**

- Расчеты проводились на оборудовании:
  - ЦКП ИПМ им. М.В. Келдыша РАН



**Спасибо за внимание!**