

26-27 сентября 2022 г.

Supercomputer simulations of turbomachinery problems with higher accuracy on unstructured meshes

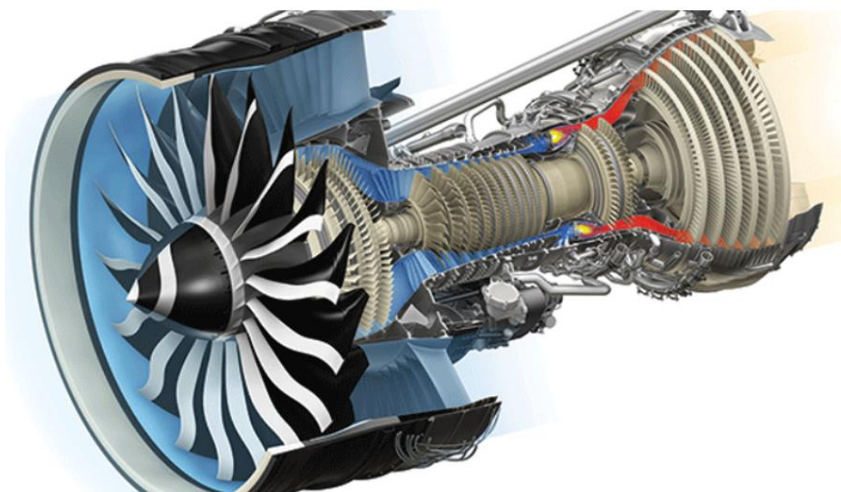


Алексей Дубень¹, Андрей Горобец¹, Сергей Суков¹,
Ольга Маракуева^{1,2}, Николай Шуваев^{1,2}, Ренат Загитов^{1,2}

¹ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва

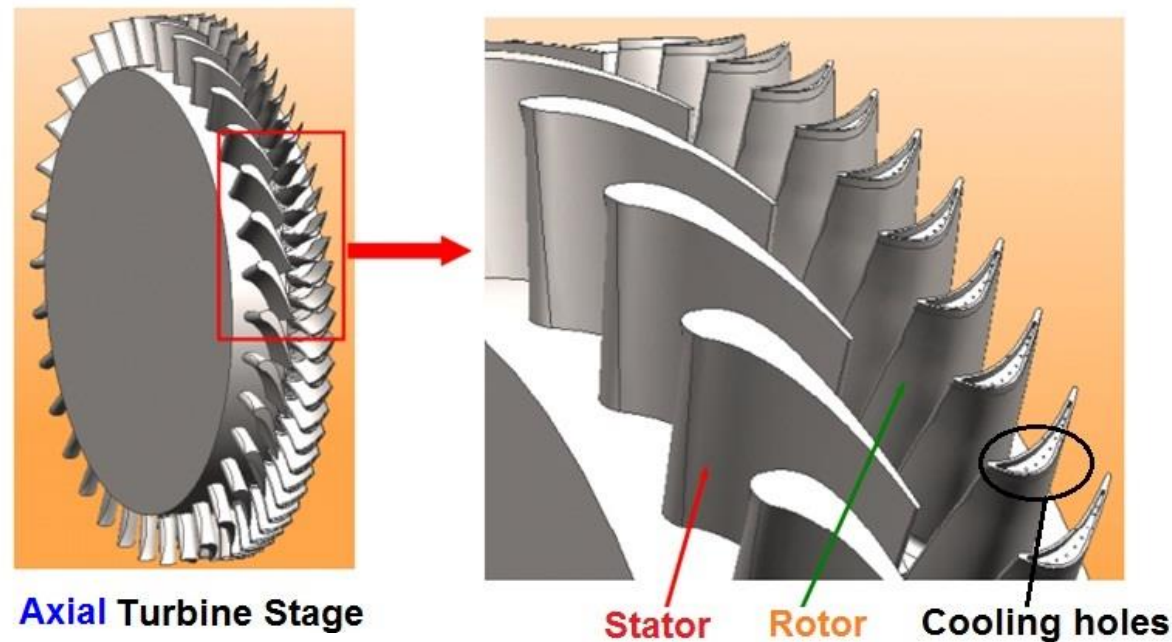
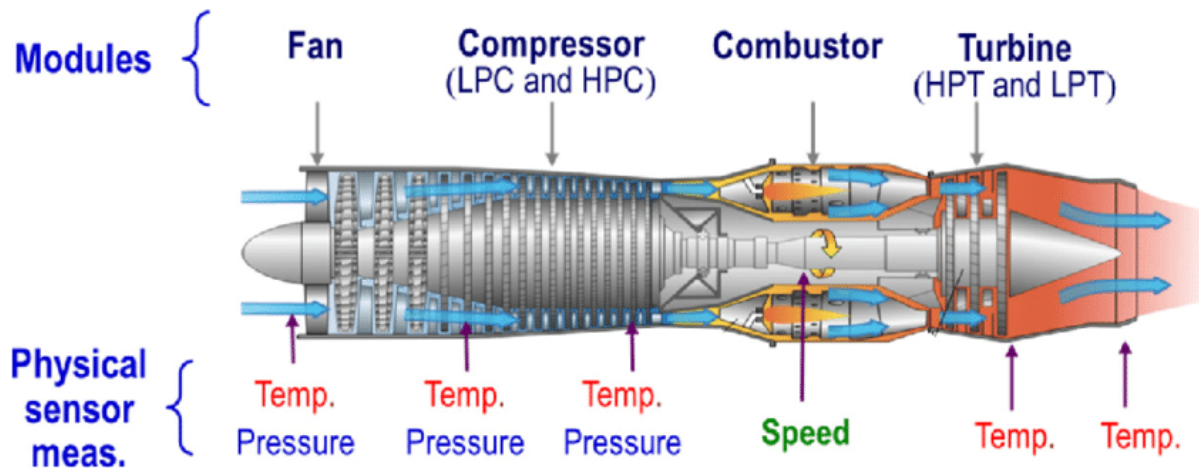
²Инженерный центр численных исследований, г. Санкт-Петербург

Введение: турбомашины



Турбореактивный двигатель

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



Axial Turbine Stage
Ступень осевой турбины

Введение: моделирование течения в турбомашинах

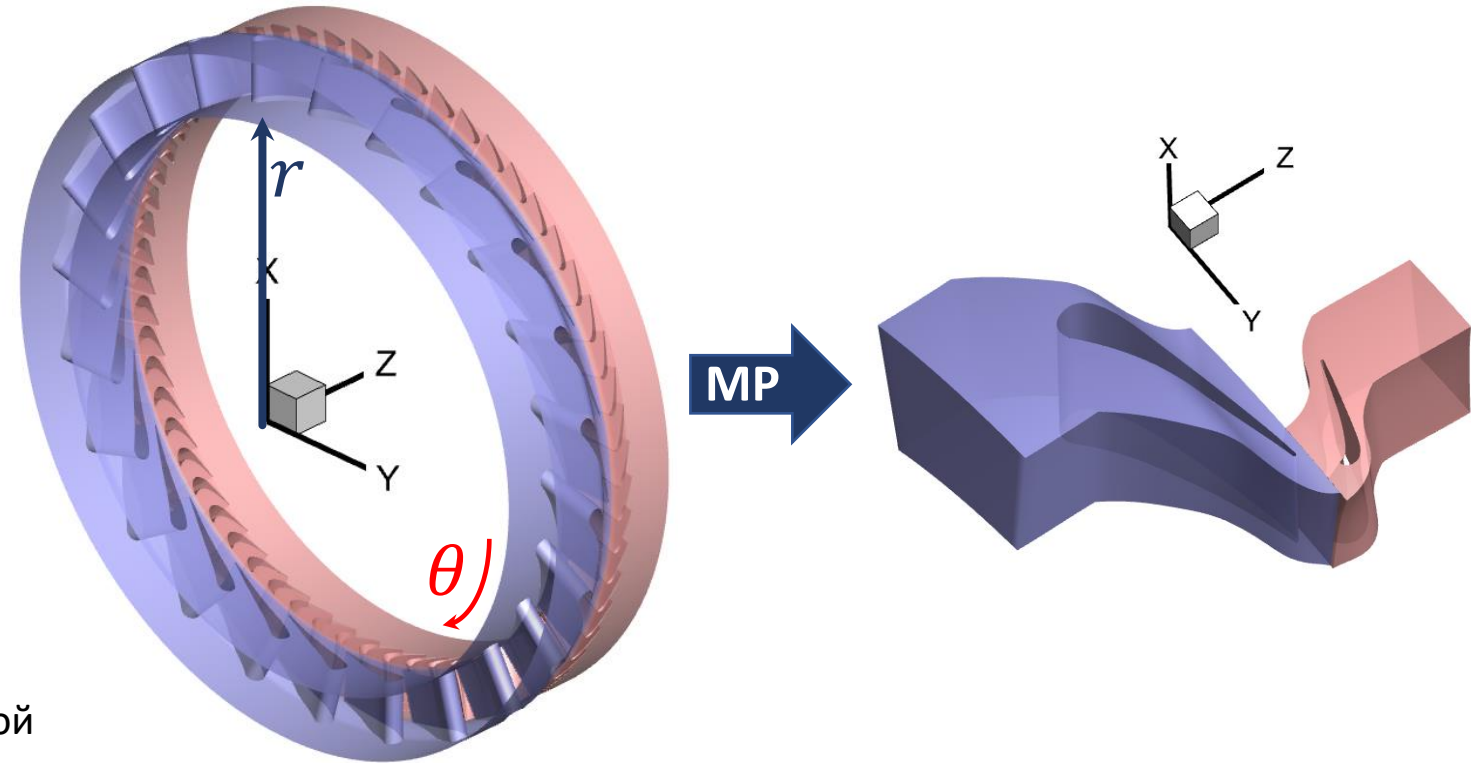


- Лопаточные венцы, вращающиеся друг относительно друга, расположены очень близко (5-50% от хорды лопатки)
 - течение носит принципиально нестационарный характер
 - взаимодействие венцов может быть значительным
- Для оценки основных аэродинамических характеристик узлов (массовый расход G , степень повышения полного давления π , КПД η), 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

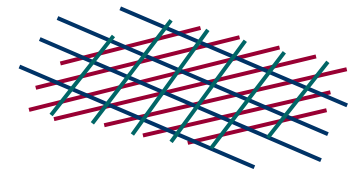
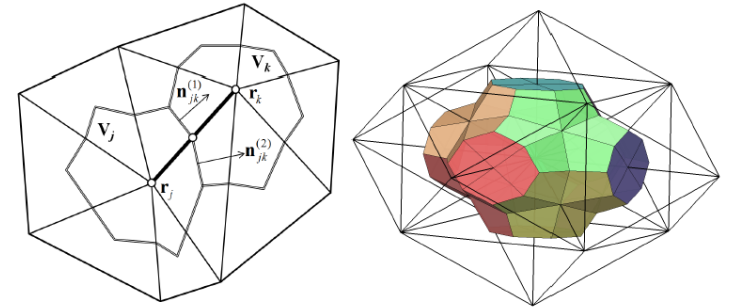


- Требования к MP
 - консервативность
 - неотражаемость (слабая отражаемость)

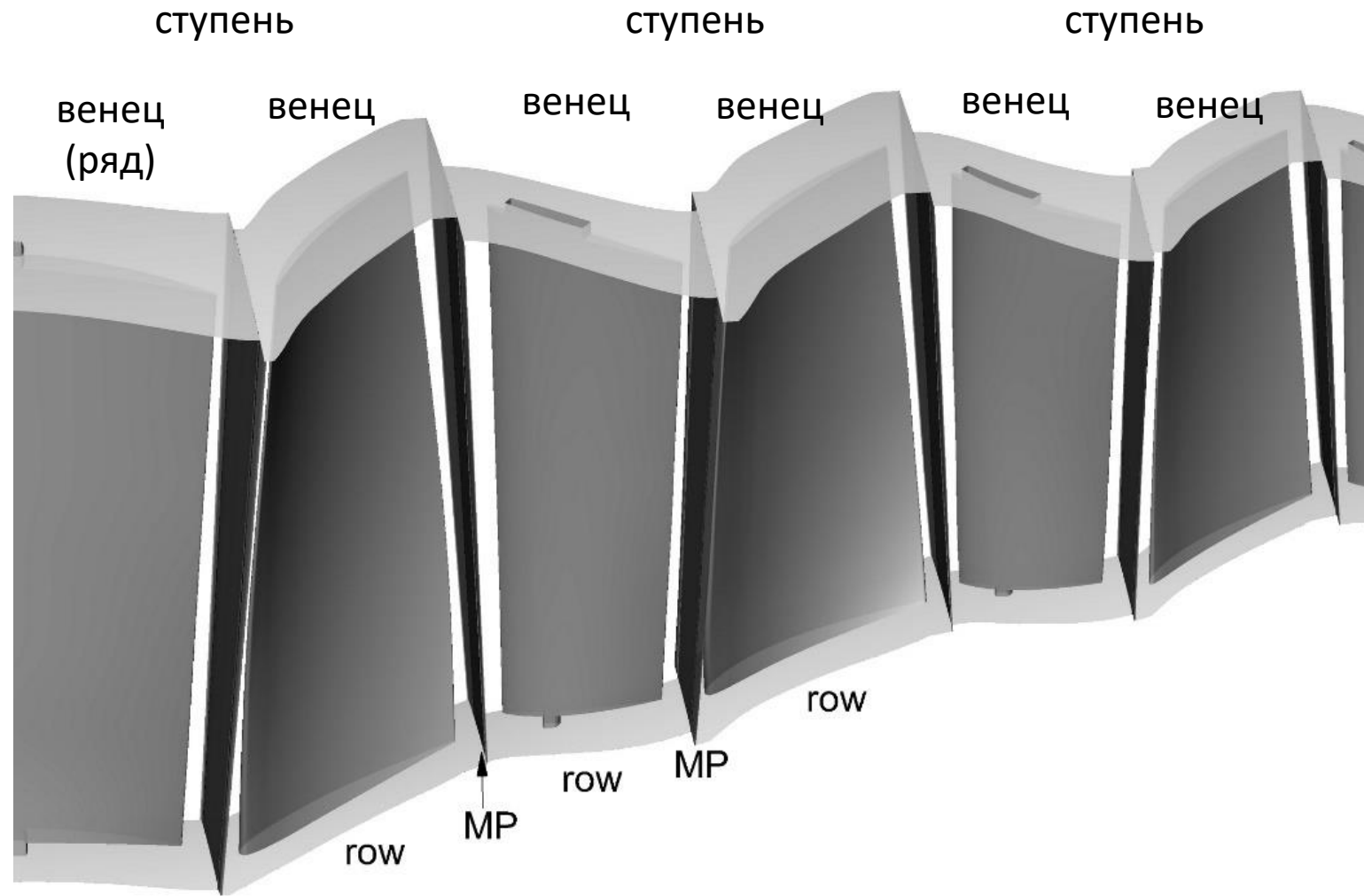
CFD код NOISEtte



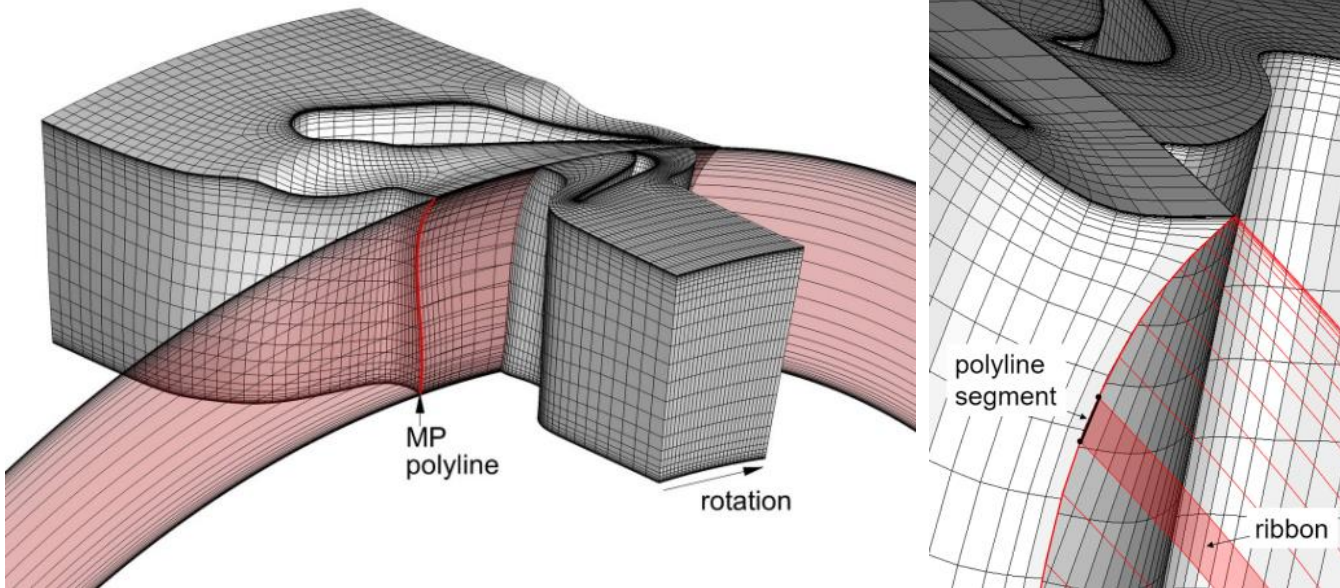
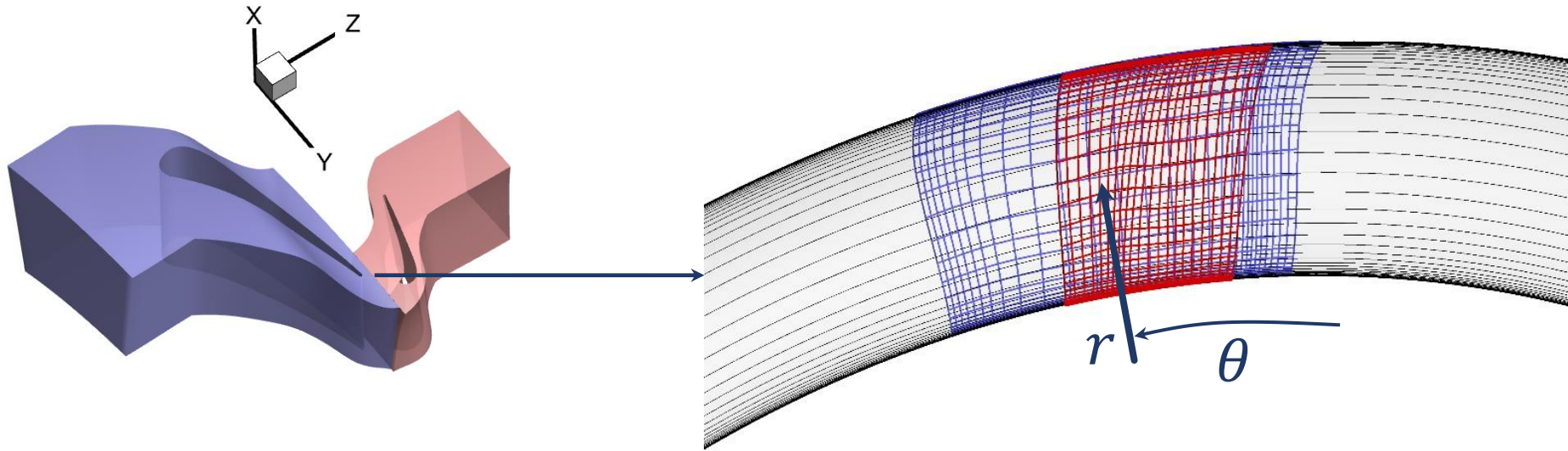
- Решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для идеального сжимаемого газа (стационарный RANS подход)
 - модели турбулентности Спалартра-Аллараса (SA) и Ментера (SST)
- Неструктурированные сетки (тетраэдры, пирамиды, призмы, гексаэдры)
- Конечно-объемная вершинно-центрированная схема
- 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 ~ 100 GPU без ощутимой потери эффективности



Турбомашины (турбины и компрессоры)



Реализация технологии MP в NOISEtte



- Поверхность смещения (MP) – 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

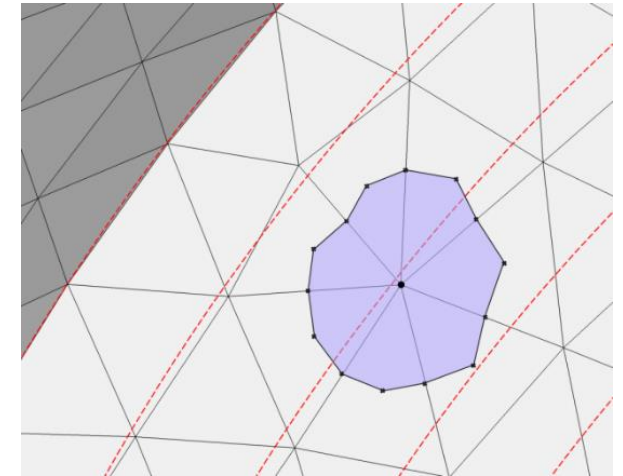
- Требования к MP:

- 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, γ - const)

Модель турбулентности SST

RPM = 12770.3 мин⁻¹

Статор: 24 лопатки

Ротор: 59 лопаток

ГУ на входе:

$P_0 = 310$ кПа

$T_0 = 400$ К

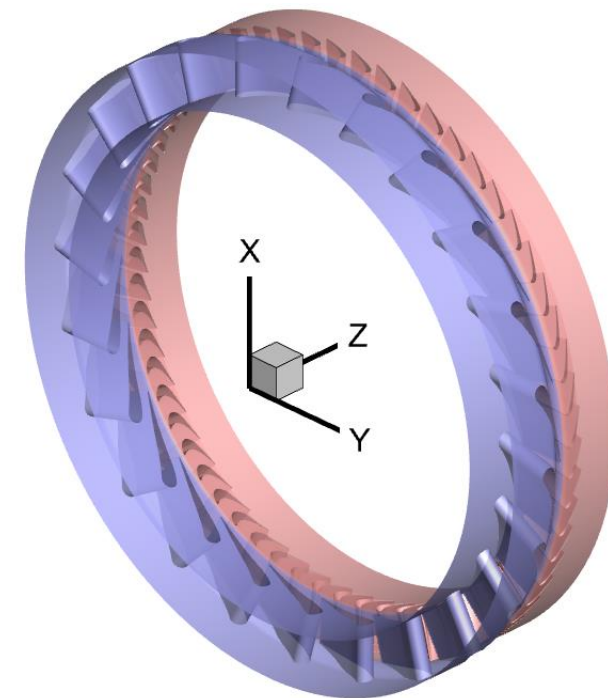
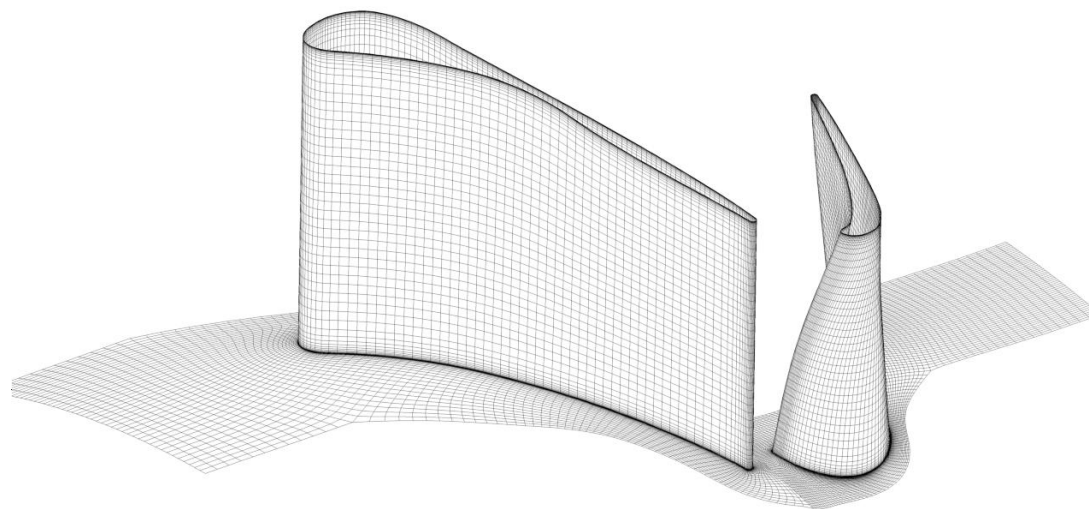
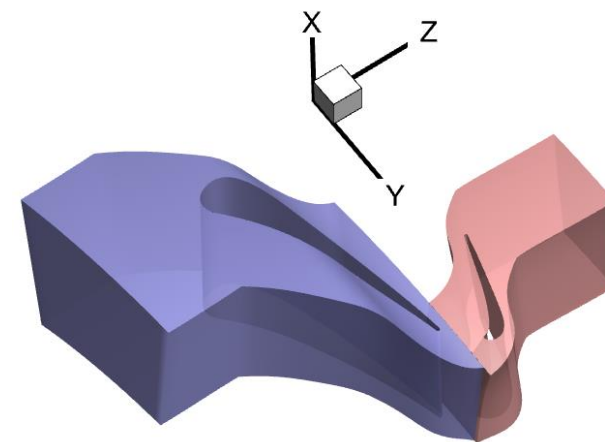
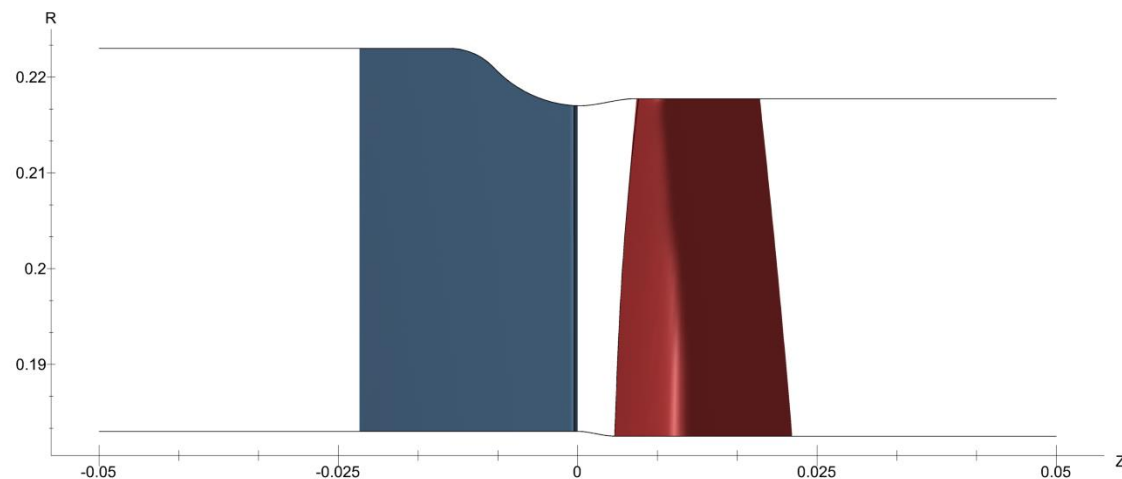
Интенсивность турб.: $Tu = 8$ -
10%

$V_z / |V| = 1$

ГУ на выходе:

$P_2 = 65.8$ кПа

Сетка: 1.1 млн



Тестирование МР: осевая одноступенчатая турбина (2/2)

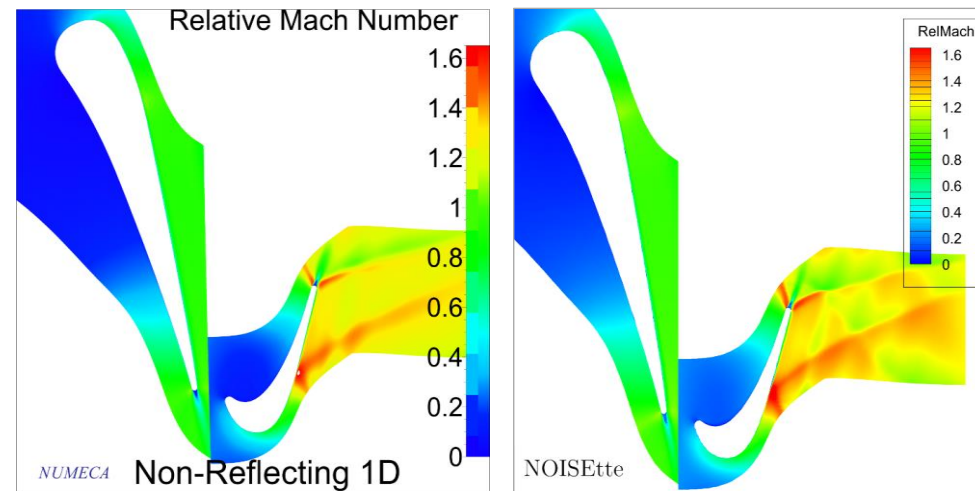


	$G, \text{Kg/s}$	π^*	$\eta^*, \%$
Experiment	4.07	-	-
NUMECA	4.20	3.94	89.9
NOISEtte	4.21	3.94	90.01

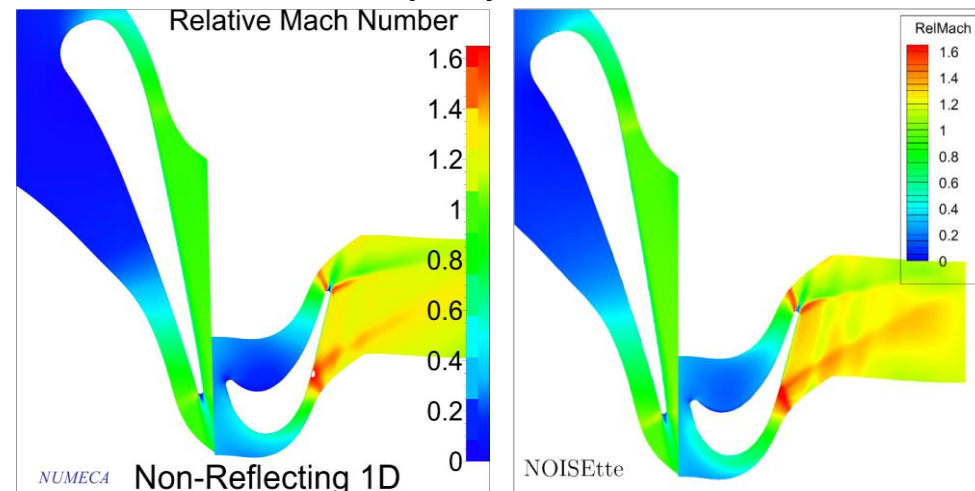
Интегральные характеристики

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, γ - const)
 Модель турбулентности SST
 RPM = 15 000 мин⁻¹
 Радиальный зазор РК 0.3 мм

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

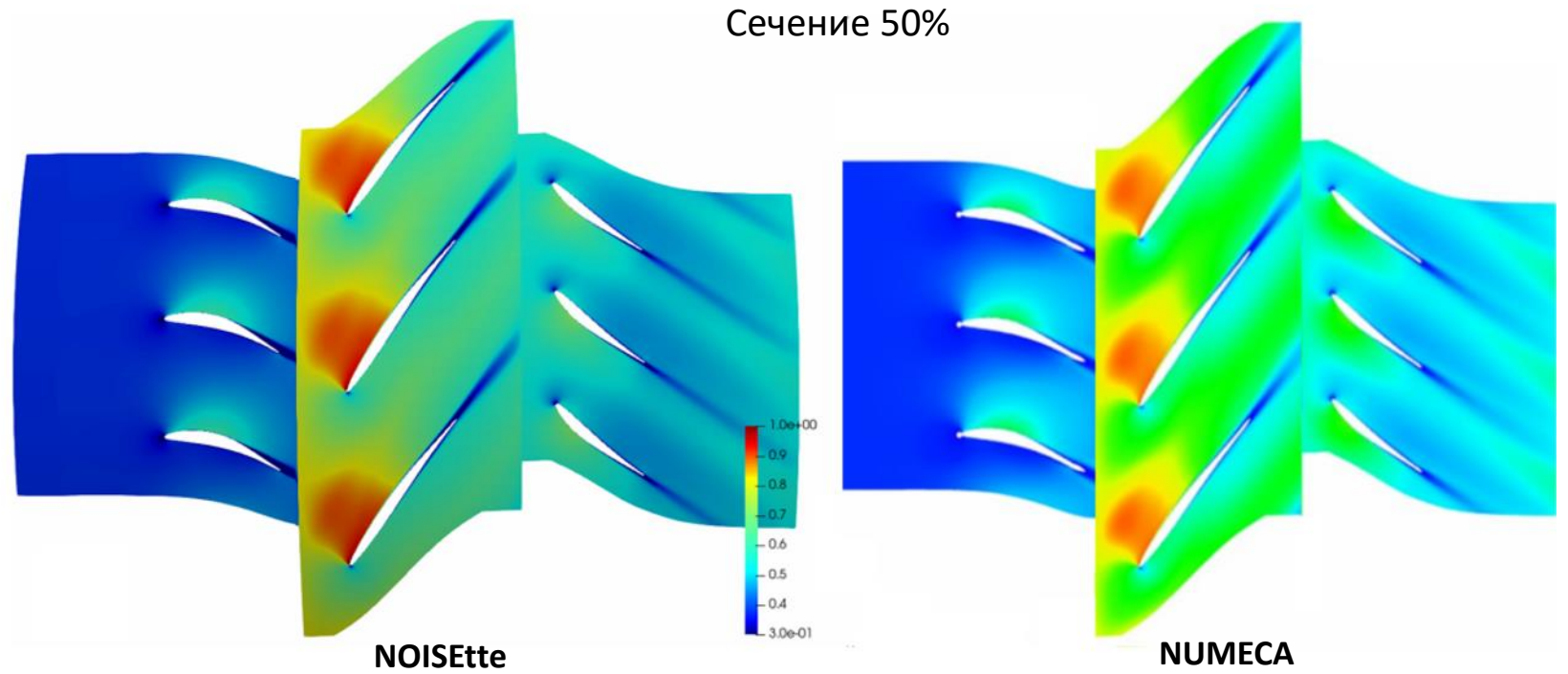
ГУ на входе:

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

ГУ на выходе:

$P_2 = 106$ кПа

Сетка: 1.24 млн ячеек



	$G, \text{Kg/s}$	π^*	$\eta^*, \%$
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, γ - const)

Модель турбулентности: SST

RPM = 16 043 мин^{-1}

Радиальный зазор 0.1016 мм

Ротор: 22 лопатки

ГУ на входе:

$P_0 = 101$ кПа

$T_0 = 288$ К

$V_z / |V| = 1$

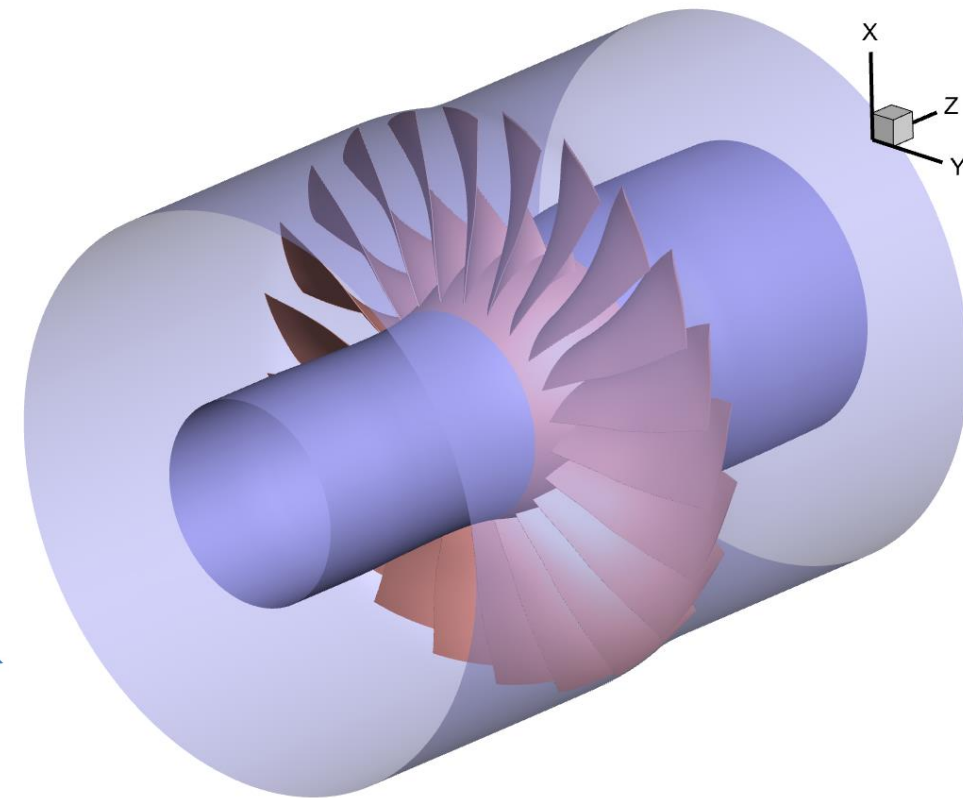
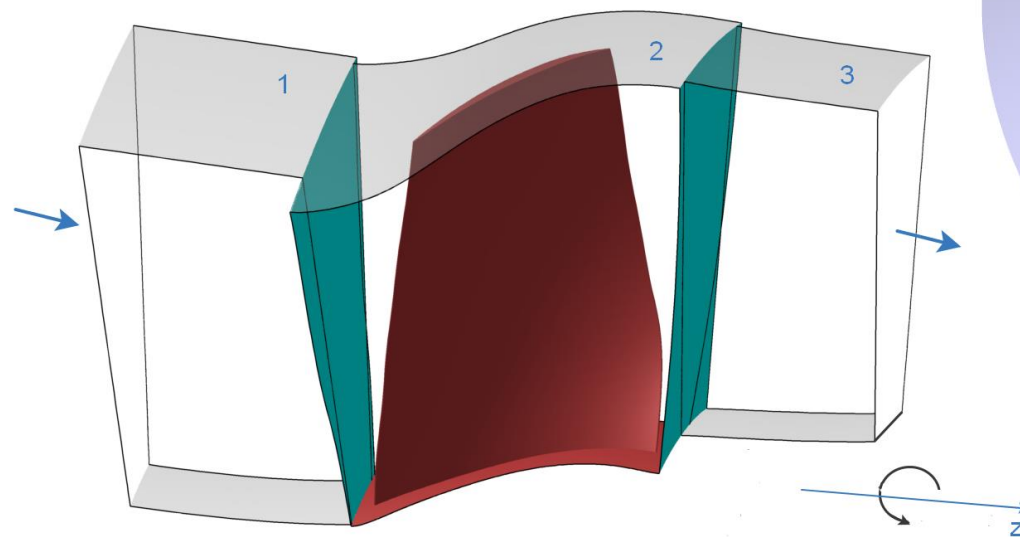
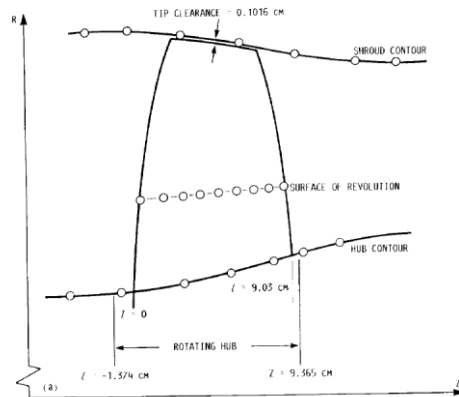
ГУ на выходе:

Варьирование P_2 или
массового расхода G

Сетка: 3 млн. узлов

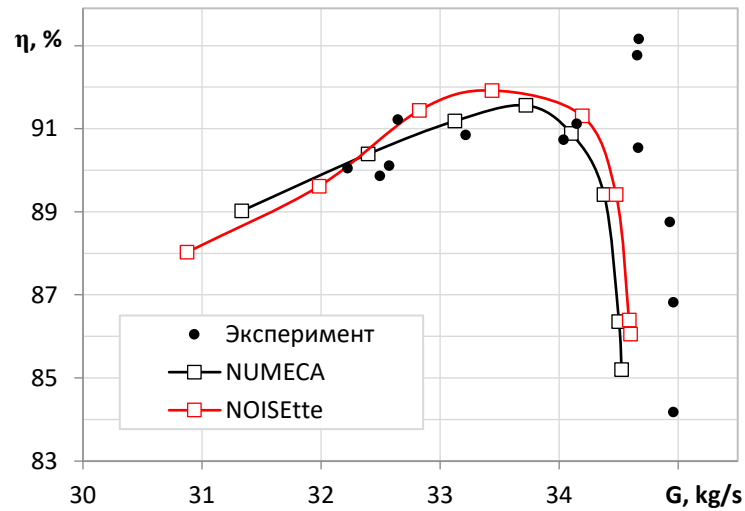
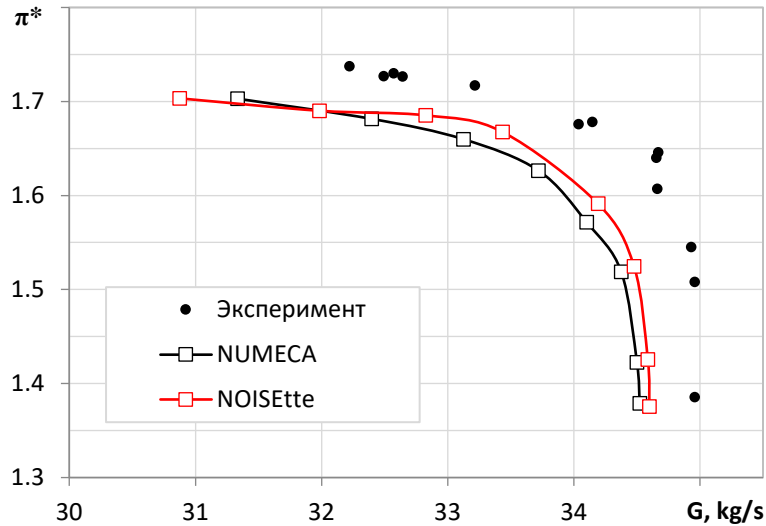
Эксперимент:

[Strazisar et al., 1989]



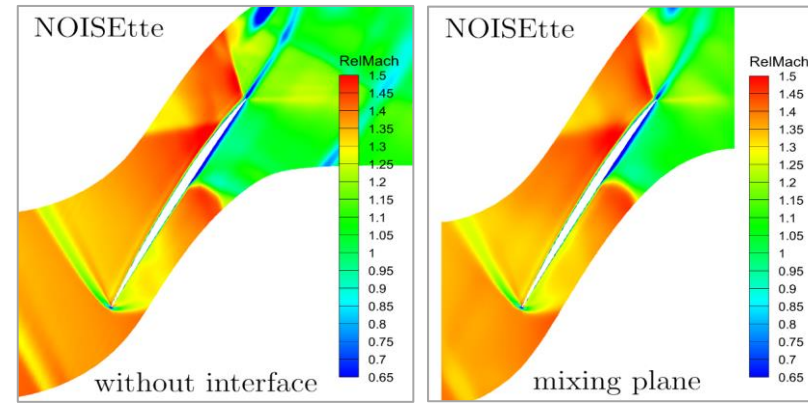
*Strazisar A.J., Wood J.R., Hathaway M.D., Suder K.L. Laser anemometer measurements in a transonic axial-flow fan rotor // National Aeronautics and Administration, Langley research center. Hampton. Virginia. NASA. TP-2879. 1989. 214 p

Тестирование МР: Rotor67 (2/2)

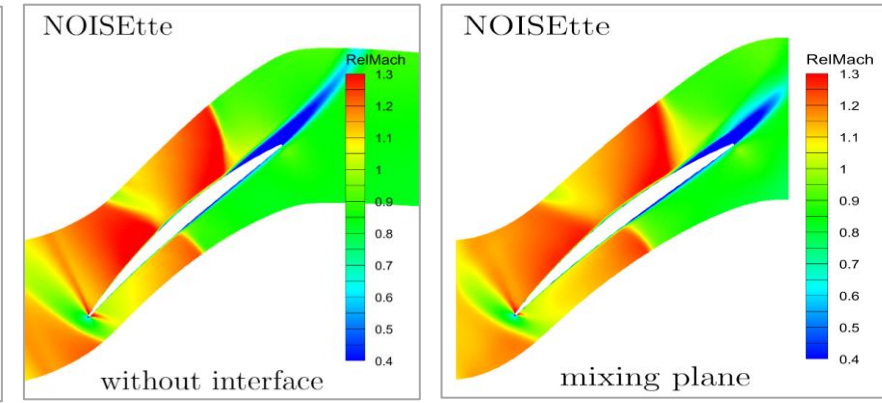


Интегральные характеристики (напорные дуги)

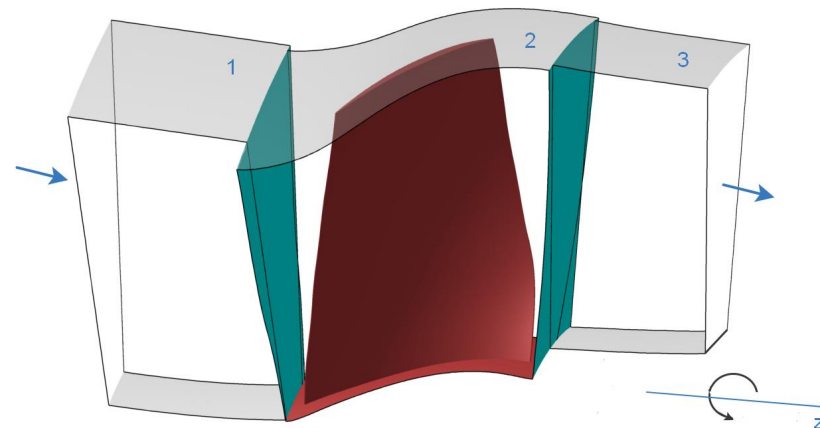
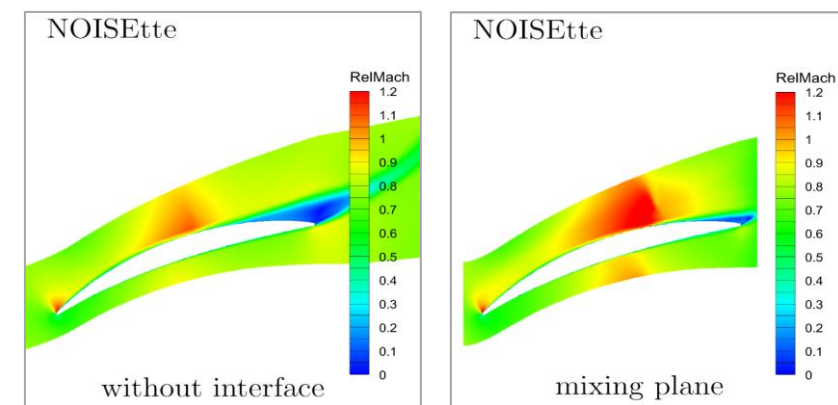
Плоское сечение у периферии



Плоское среднее сечение



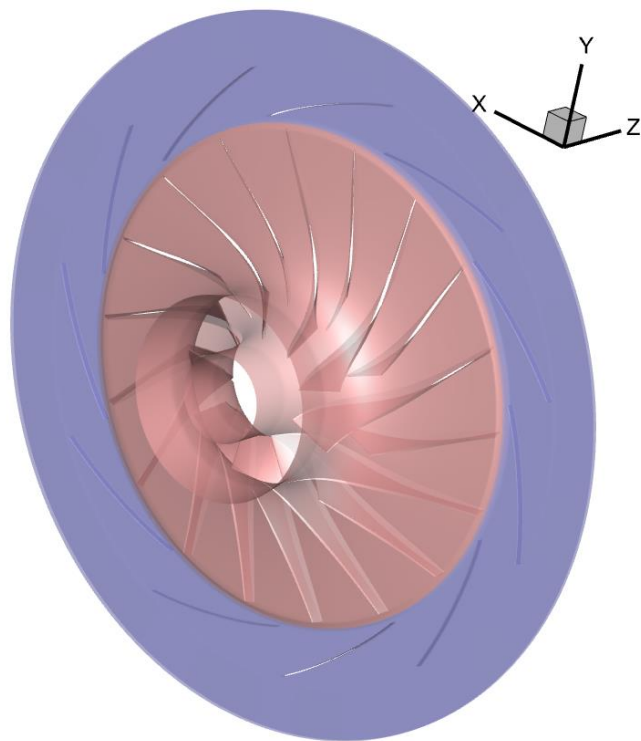
Плоское привтулочное сечение



Тестирование МР: центробежный компрессор



Совершенный газ
 (C_p - const, γ - const)
 Модель турбулентности:
 SST
 RPM = 36 000 мин⁻¹
 Сетка 450 тыс.



ГУ на входе:

$P_0 = 101$ кПа

$T_0 = 288$ К

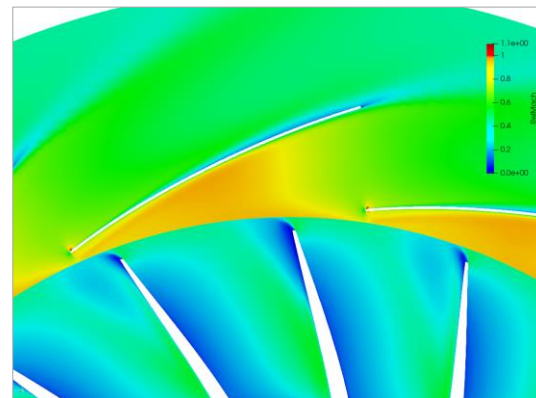
$V_z / |V| = 1$

ГУ на выходе:

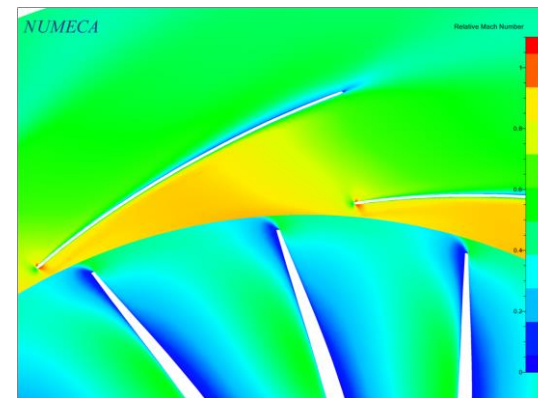
$P_2 = 300$ кПа

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

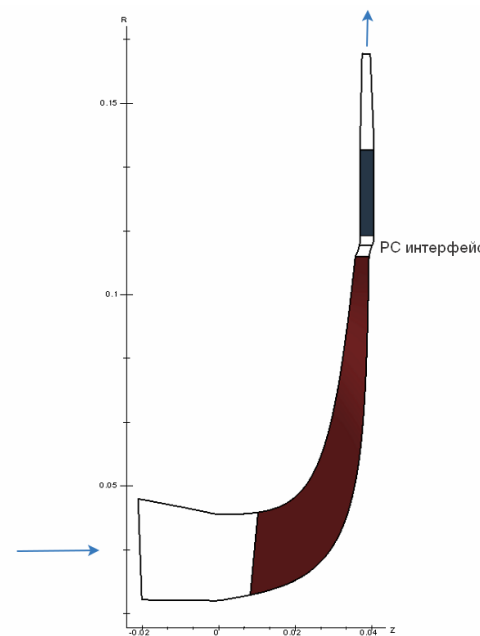
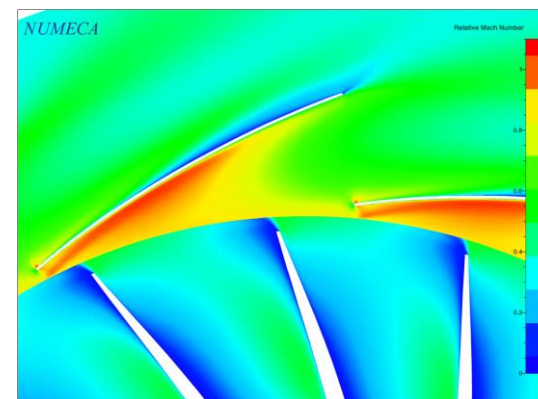
NOISEtte



NUMECA NR



NUMECA MP



Тестирование параллельной эффективности

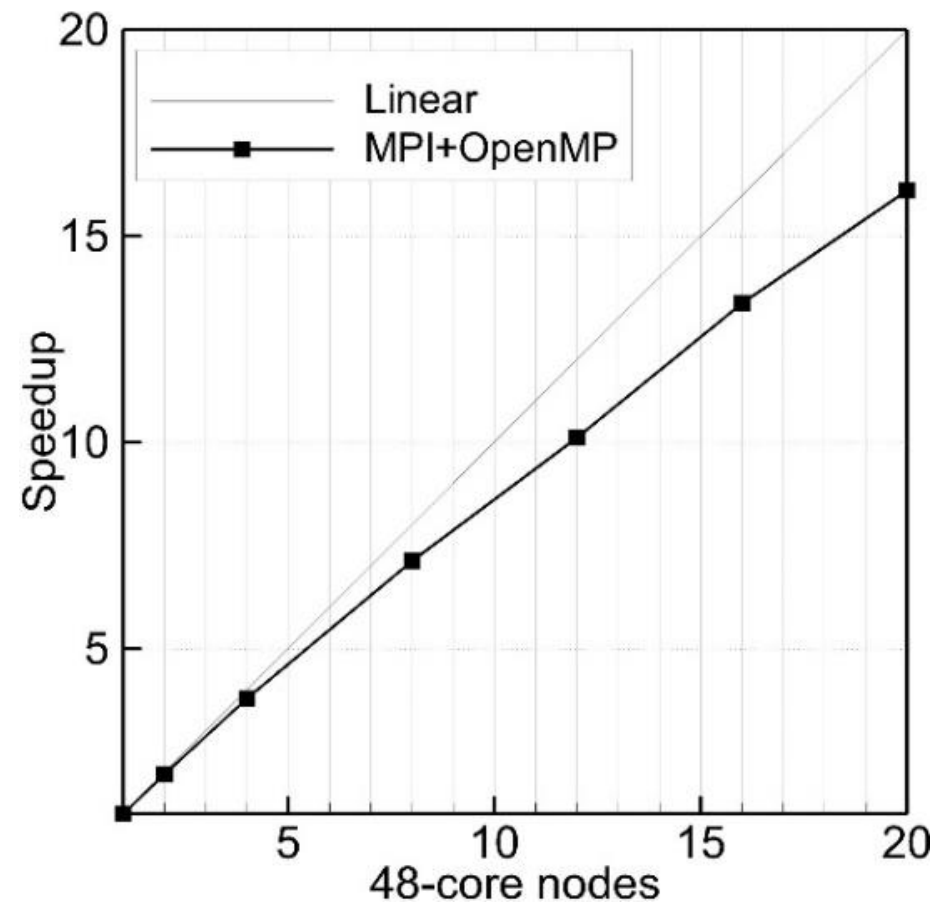
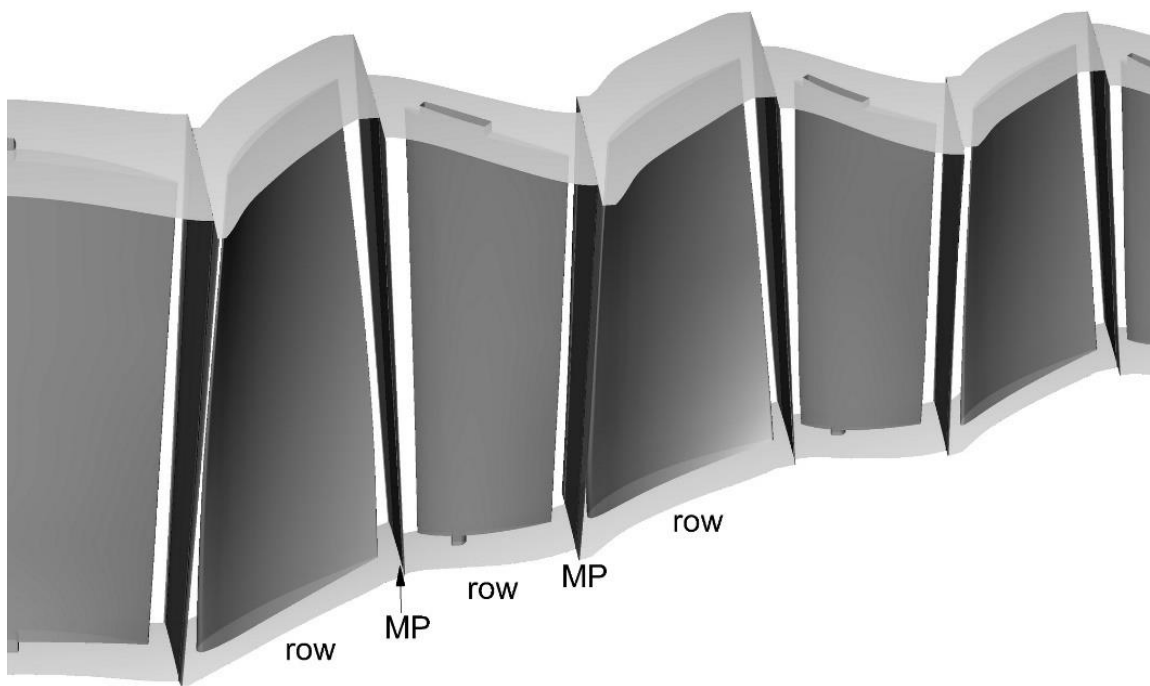


Задача: 4 ступени 12-ступенчатого компрессора вертолетного двигателя ТВ3-117

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!