

# Расчет осевого газового компрессора в пакете программ ANSYS CFX-5.7.1

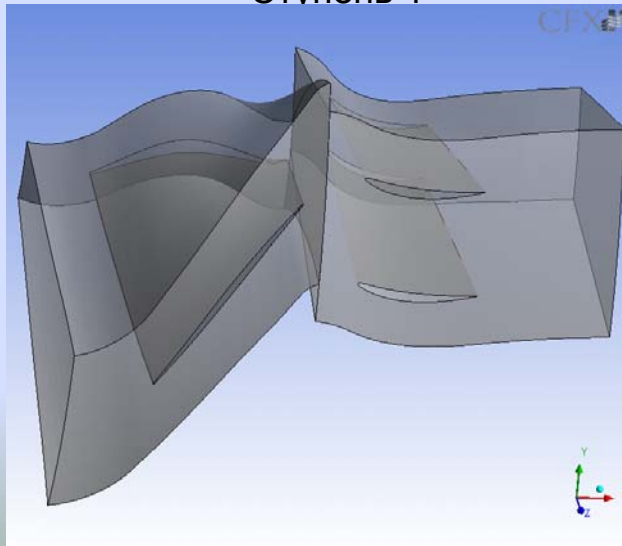
*Н.А.Владимилова, К.В.Мякушев*

---

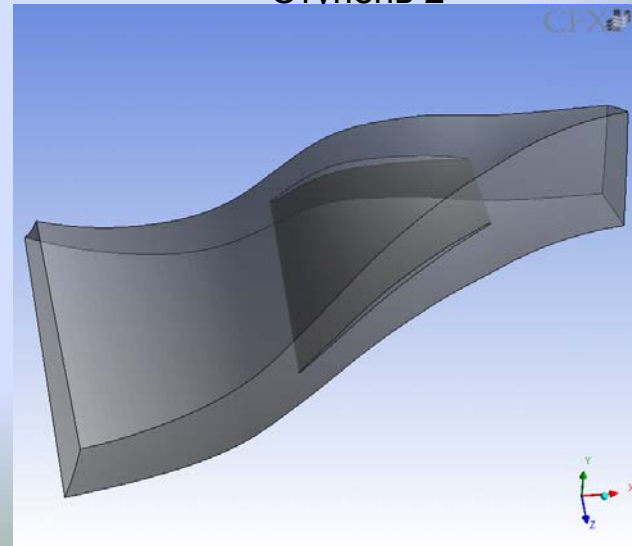
- постановка задачи: геометрия, расчетная область и граничные условия
- топология и размер расчетной сетки (пакет *ICEM CFD*)
- результаты расчетов

Рассмотрена задача численного моделирования течения вязкого газа в осевом турбокомпрессоре, представленном двумя отдельными ступенями. Ступень 1 состоит из вращающегося первого венца (ротор, 17 лопаток) и неподвижного второго венца (статор, 32 лопатки). Скорость вращения рабочего колеса 1912 рад/сек. На входе в первую ступень задается полное давление (101325 Па) и полная температура (288°K). На выходе из ступени задан суммарный расход воздуха 19 кг/сек. Ступень 2 имеет только одно рабочее колесо, состоящее из 35 лопаток, и вращающееся со скоростью 2380 рад/сек. На входе во вторую ступень также заданы полное давление и полная температура (101325 Па и 288°K), на выходе – суммарный расход 5.44 кг/сек. Форма поверхности лопаток и геометрия расчетной области, а также общий вид ступеней компрессора для первой и второй ступеней представлены на этом и следующем слайде.

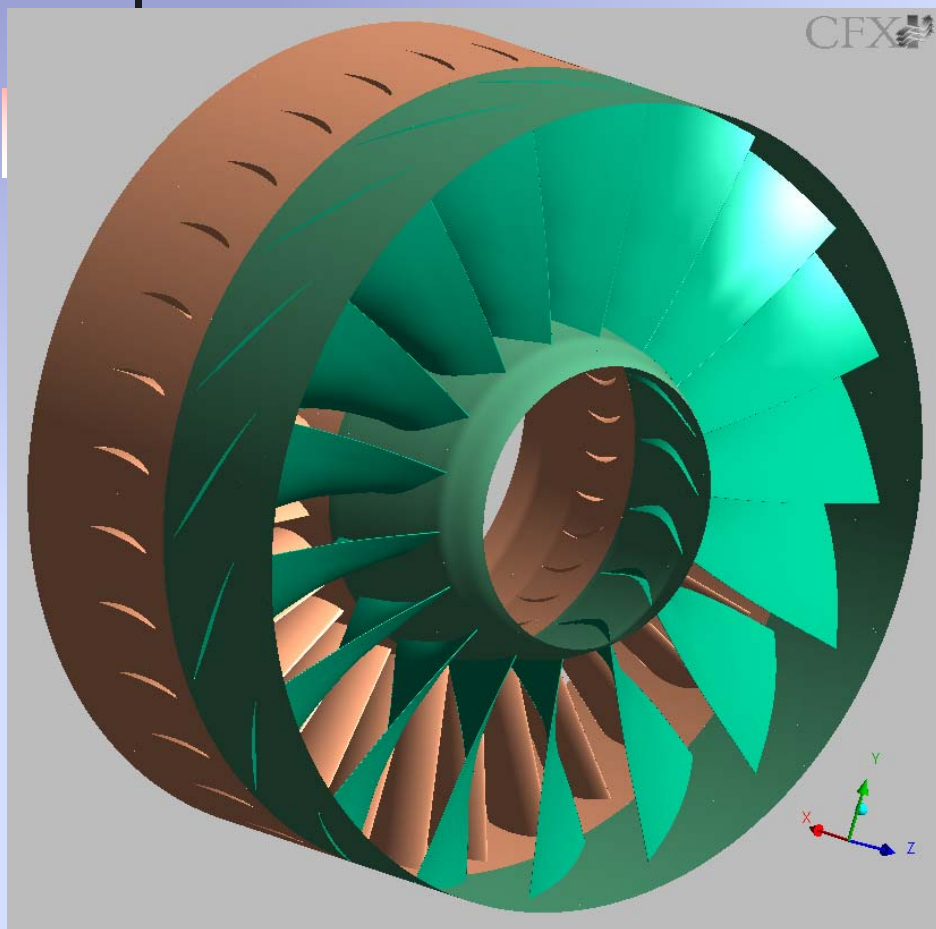
Ступень 1



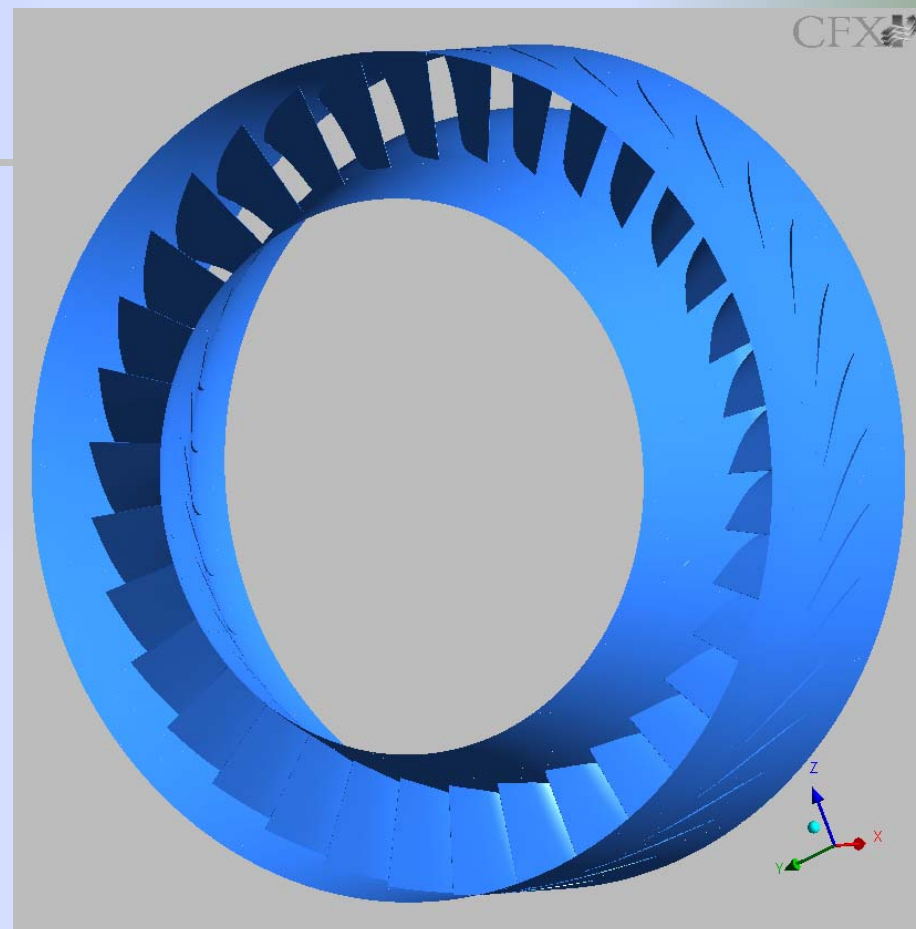
Ступень 2

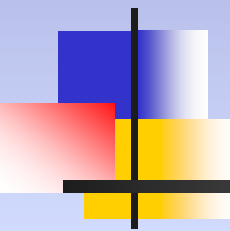


Ступень 1



Ступень 2



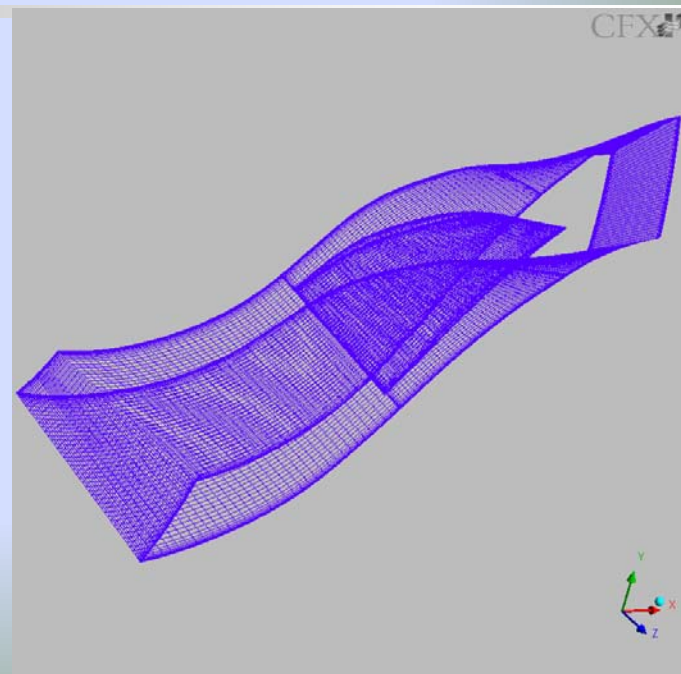
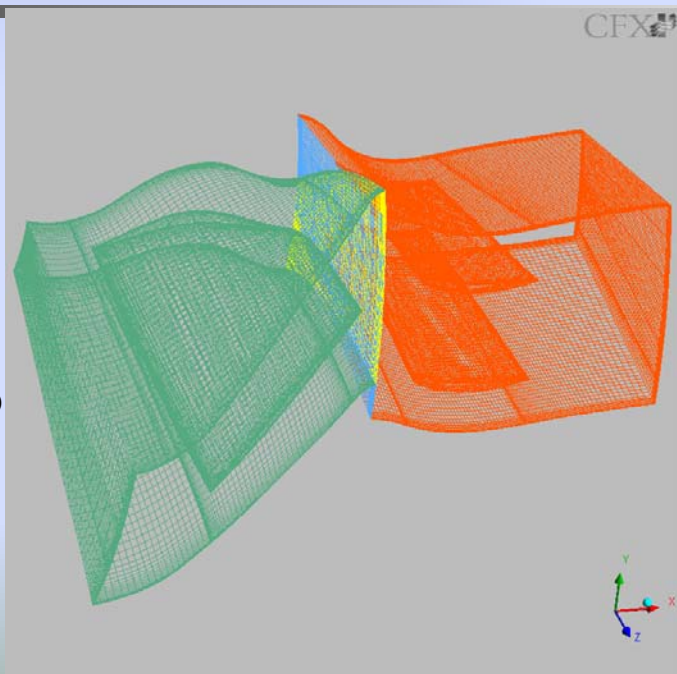


Расчеты проводились в пакете *ANSYS CFX-5.7.1* на персональном компьютере Intel Pentium 4 CPU 2.00 GHz с объемом оперативной памяти 1 GB, гексаэдральные расчетные сетки (880 тыс. узлов для ступени 1, статор – 540 тыс. и ротор – 440 тыс. узлов соответственно, и 450 тыс. узлов для ступени 2) построены в пакете *ANSYS ICEM CFD 5.1*, модуль *HEXA*. Для решения уравнений Навье-Стокса, описывающих вязкие турбулентные течения, использовался метод конечного объема, численная схема высокого порядка для конвективных и вязких членов и модель турбулентности *SST (Shear-Stress-Transport)  $k-\omega$* , позволяющая моделировать течения с развитыми отрывными зонами. Для получения квазистационарного решения требовалось осуществить 40-60 итераций, что соответствовало 7.5-11 часам для первой ступени и 3.5-6 часам работы центрального процессора для второй ступени компрессора соответственно. Квазистационарный расчет использовался в качестве начального приближения для нестационарного расчета первой ступени (время поворота лопатки ротора на один период 0.0002 с, 50 шагов по времени).

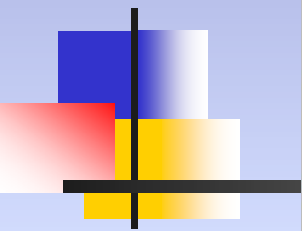
Средствами модуля *ANSYS ICEM CFD 5.1* (модуль *HEXA*) в расчетных областях для ступени 1 и 2 компрессора построены структурные гексаэдральные сетки с необходимым (параметр  $y^+ \leq 30$ ) прижатием в окрестности поверхности лопаток и твердых стенок. На границах расчетных областей использовались граничные условия типа "Inlet", "Outlet (вход-выход)", "Wall" (на лопатках и твердых стенках) и "Interface" (периодические интерфейсы и интерфейсы типа "Frozen Rotor", "Stage" и "Transient Rotor-Stator" на границе ротор/статор с полным сохранением консервативных потоков). На этом и следующем слайдах представлены фрагменты расчетных сеток для ступени 1 и ступени 2 компрессора.

Ступень 1

Ступень 2



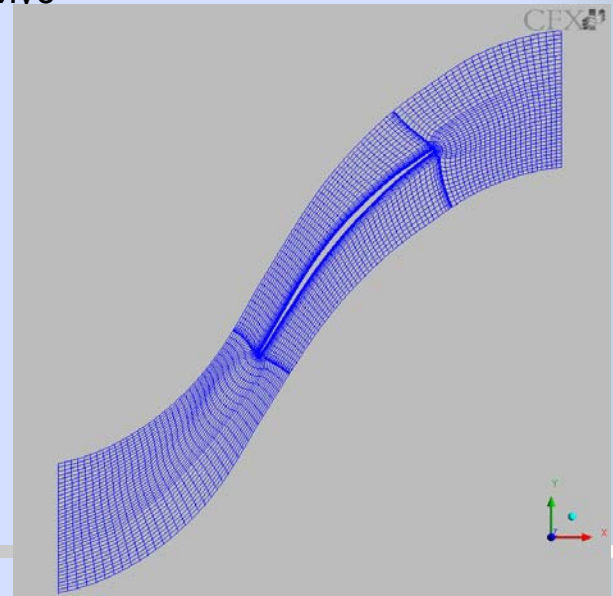
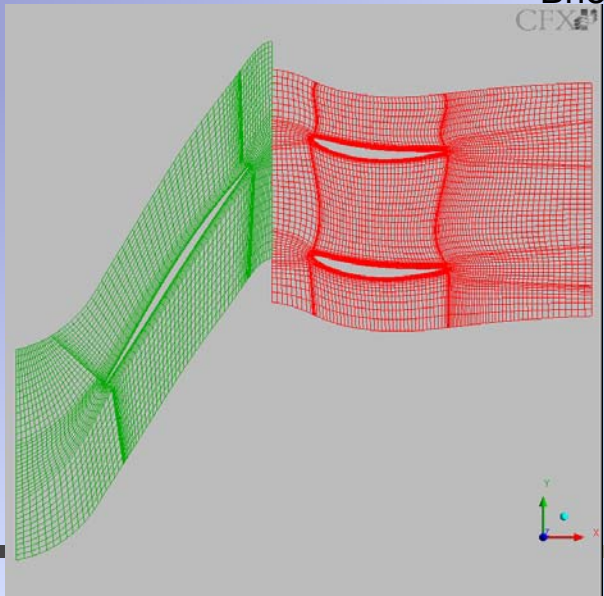
зеленый – ротор  
красный – статор  
желтый/голубой –  
интерфейс ротор/статор



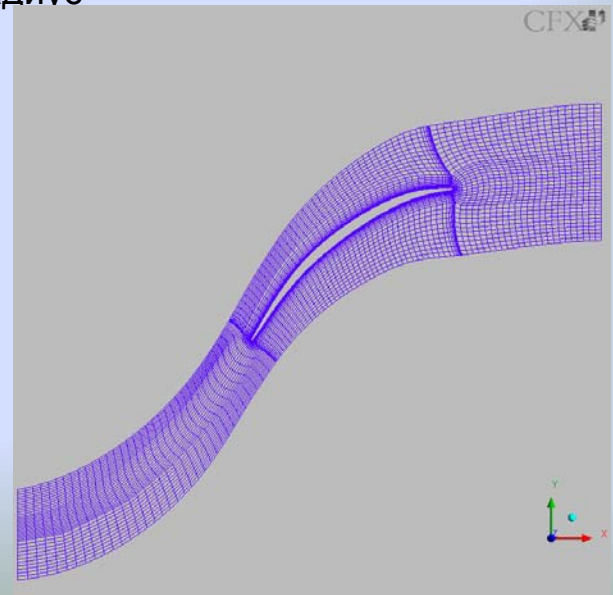
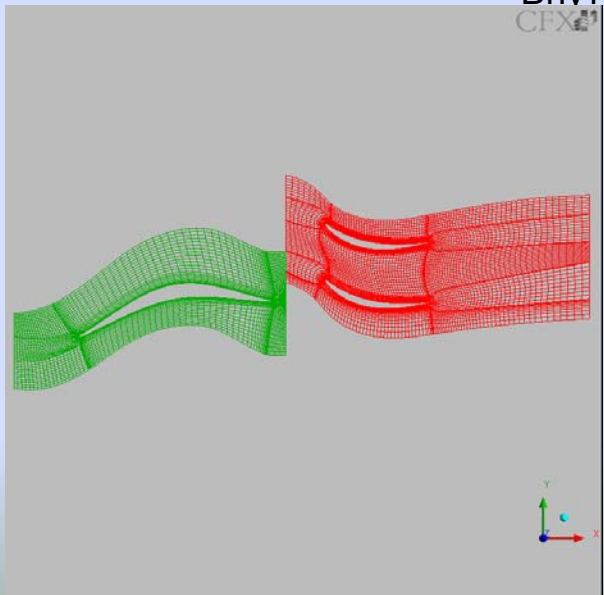
Ступень 1

Внешний радиус

Ступень 2



Внутренний радиус

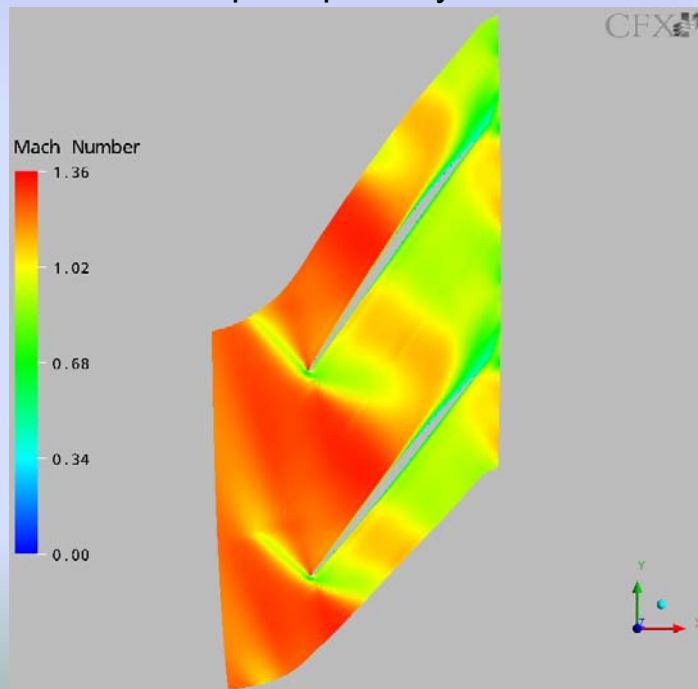


## Результаты расчетов. Распределенные характеристики.

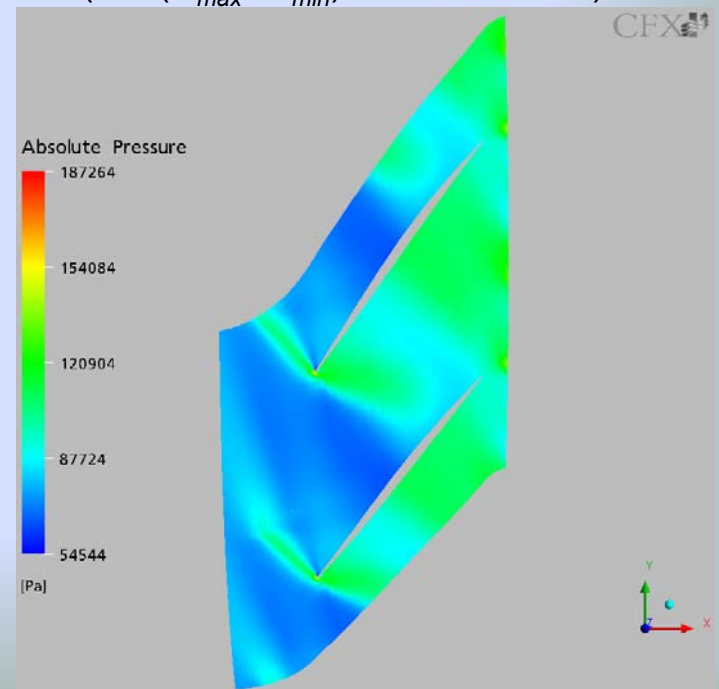
На этом и следующих слайдах представлены полученные результаты расчетов различных распределенных характеристик - полей скоростей (местных чисел Маха) и статического давления в нескольких радиальных сечениях ступени 1 (рабочее колесо, статор) и ступени 2 (рабочее колесо) компрессора.

### Ступень 1, рабочее колесо

Поля местных чисел Маха (слева) и статического давления (справа) в трех промежуточных сечениях  $r = const$  ( $r / (R_{max} - R_{min}) = 0.1, 0.5, 0.9$ )

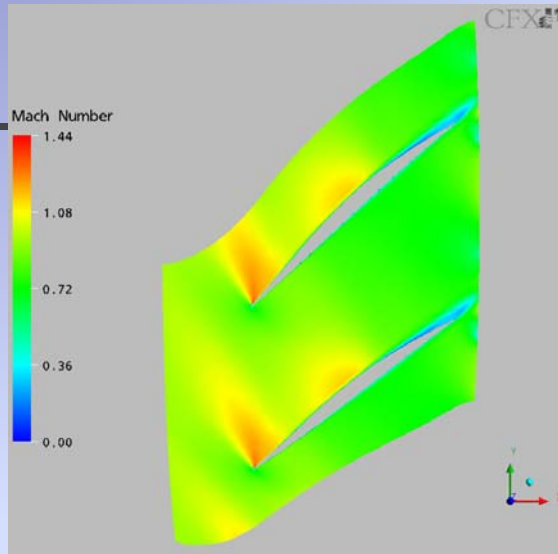
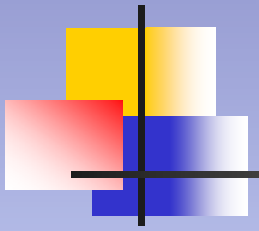


$r = 0.1$

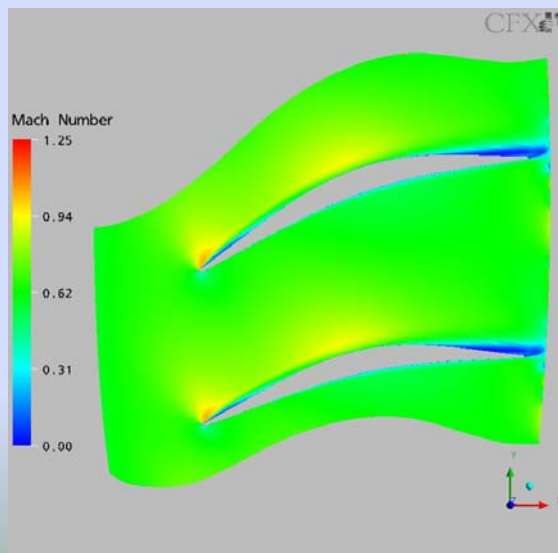
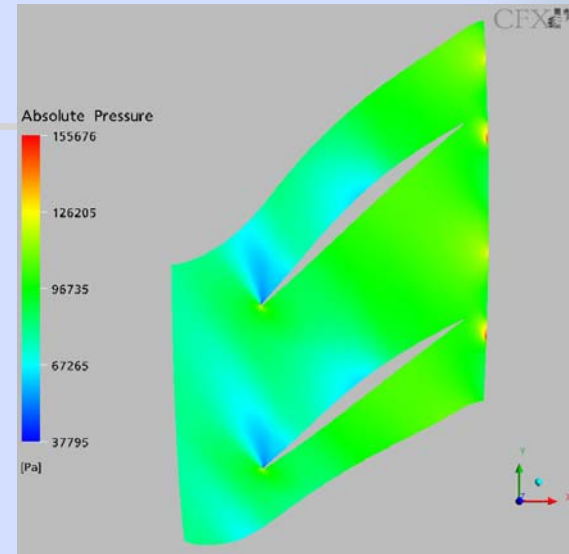


# Ступень 1, рабочее колесо

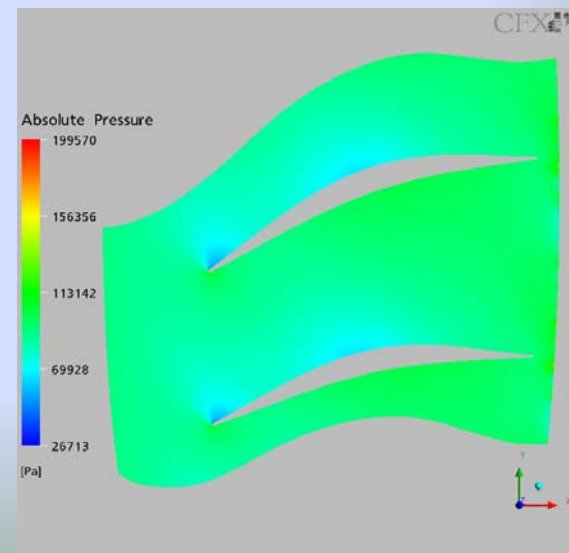
Поля местных чисел Маха (слева) и статического давления (справа)  
в промежуточных сечениях  $r = const$



$r = 0.5$



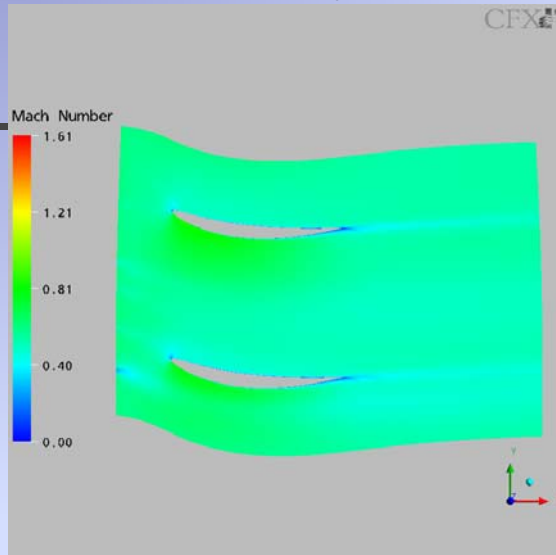
$r = 0.9$



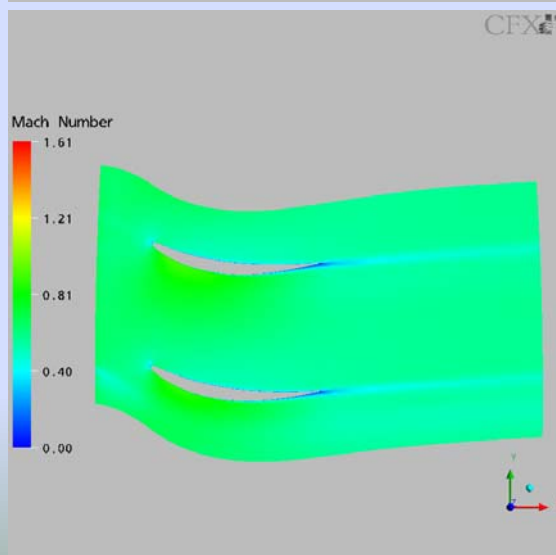
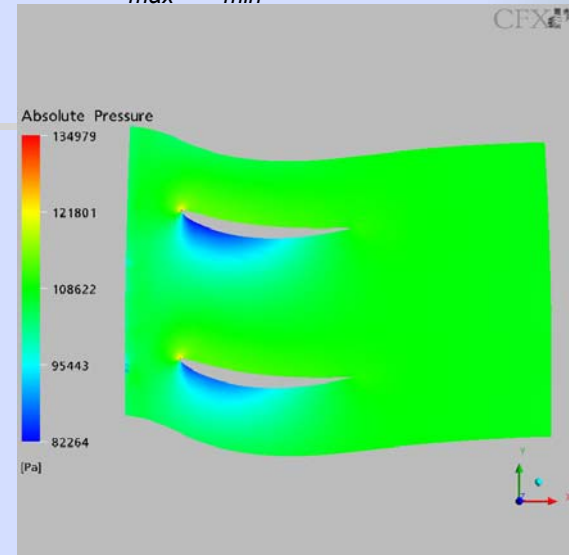


# Ступень 1, статор

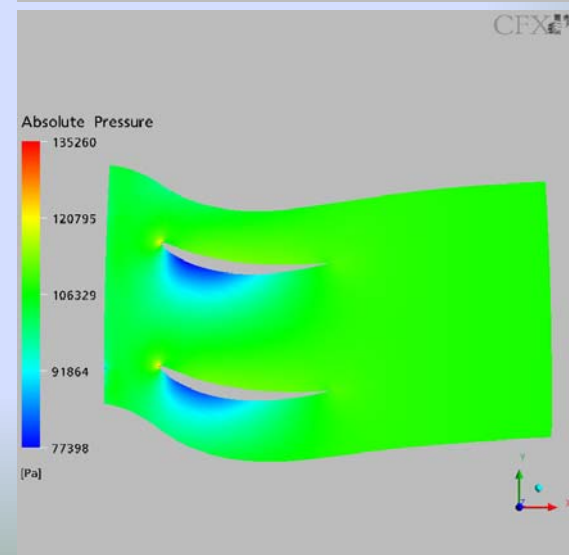
Поля местных чисел Маха (слева) и статического давления (справа)  
в трех промежуточных сечениях  $r = const$  ( $r / (R_{max} - R_{min}) = 0.1, 0.5, 0.9$ )



$r = 0.1$

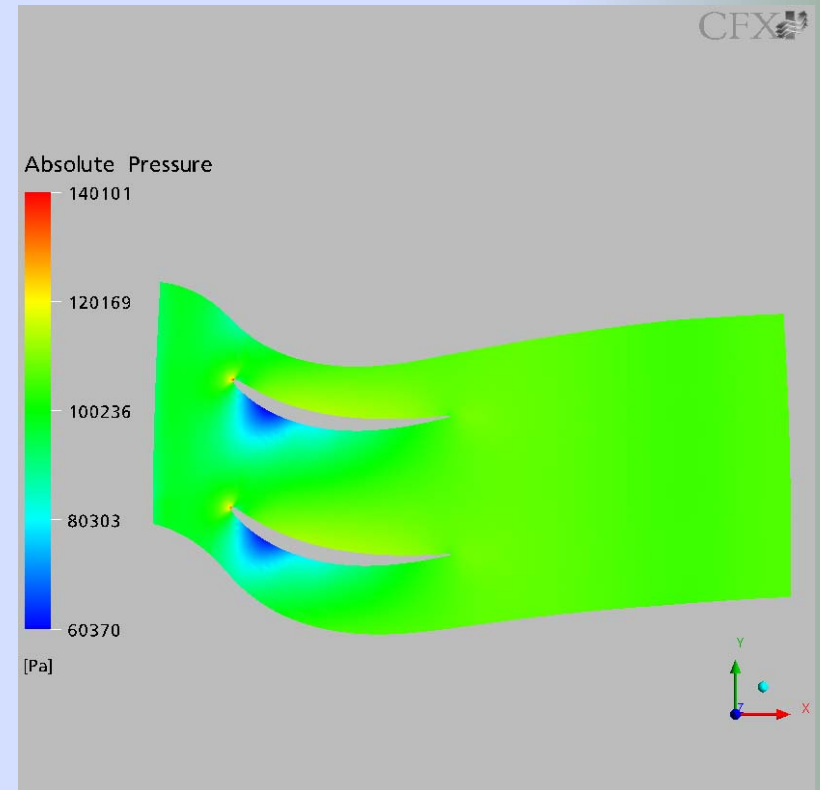
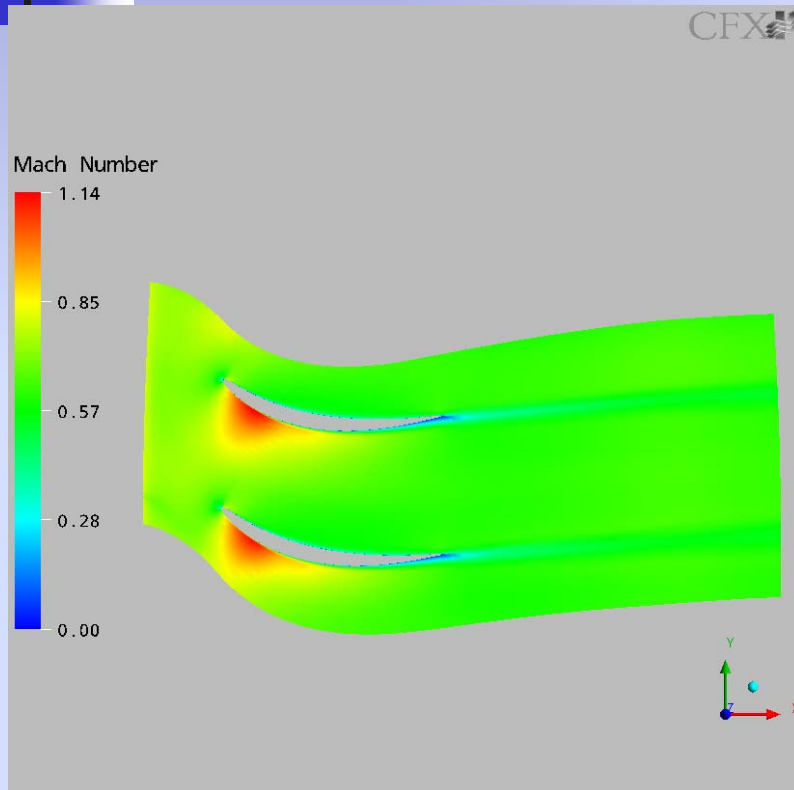


$r = 0.5$



## Ступень 1, статор

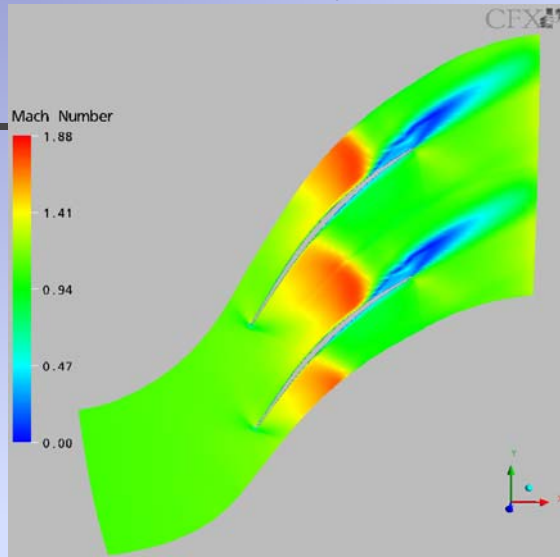
Поля местных чисел Маха (слева) и статического давления (справа)  
в промежуточных сечениях  $r = const$



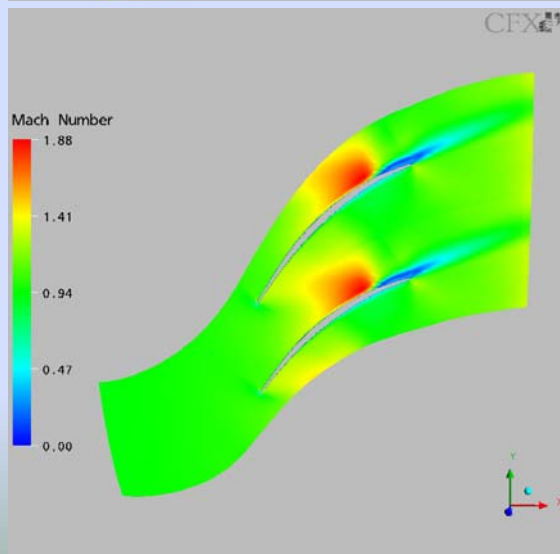
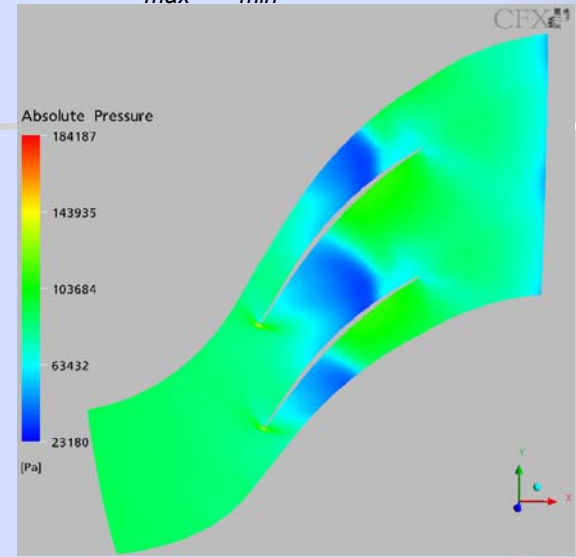
$r = 0.9$

## Ступень 2

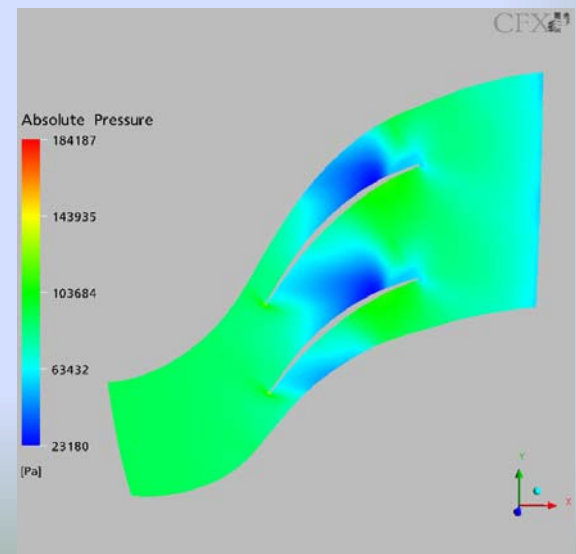
Поля местных чисел Маха (слева) и статического давления (справа)  
в трех промежуточных сечениях  $r = const$  ( $r / (R_{max} - R_{min}) = 0.1, 0.5, 0.9$ )



$r = 0.1$

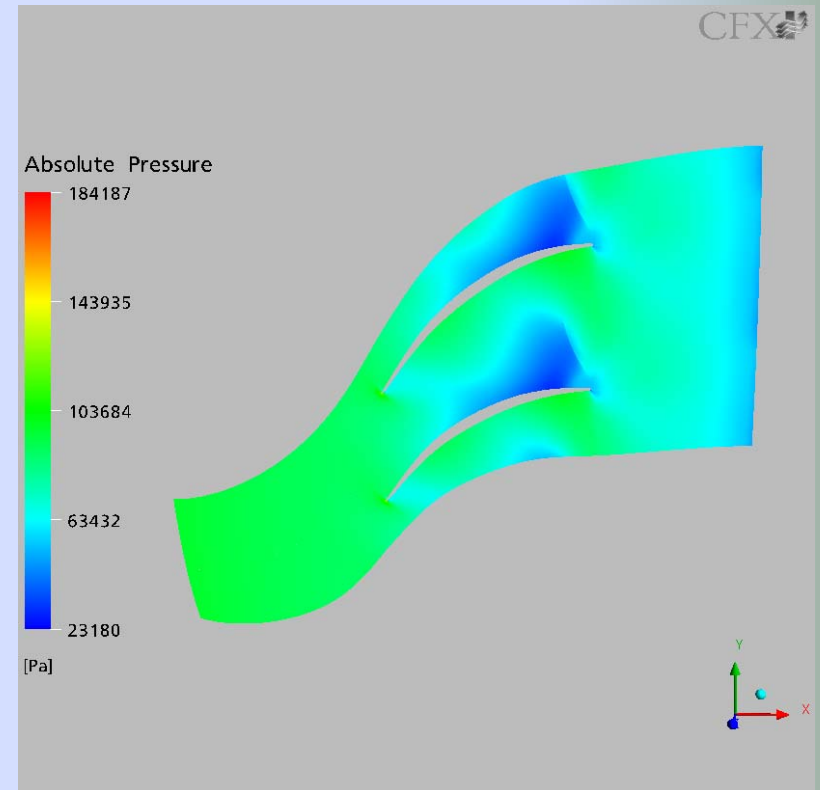
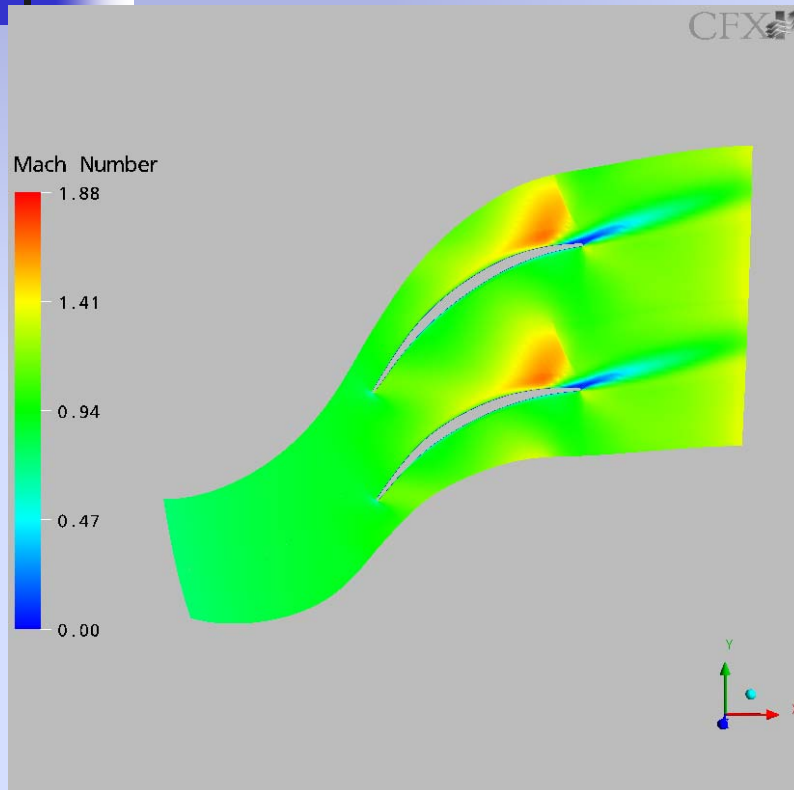


$r = 0.5$



## Ступень 2

Поля местных чисел Маха (слева) и статического давления (справа)  
в промежуточных сечениях  $r = const$



$r = 0.9$

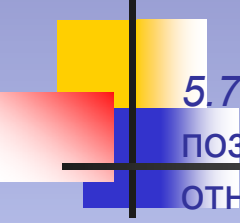
## Интегральные характеристики

КПД осевого компрессора:  $\eta_{\text{КПД}} = [(P_0^{\text{out}}/P_0^{\text{in}})^{0.286} - 1] / [T_0^{\text{out}}/T_0^{\text{in}} - 1]$

$$(\gamma-1)/\gamma=0.286$$

Массовое осреднение MassFlowAve			Осреднение по площади AreaAve		
$P_0^{\text{out}}/P_0^{\text{in}}$	$T_0^{\text{out}}/T_0^{\text{in}}$	КПД	$P_0^{\text{out}}/P_0^{\text{in}}$	$T_0^{\text{out}}/T_0^{\text{in}}$	КПД
Ступень 1					
1.307	1.097	0.82	1.303	1.098	0.80
Ступень 2					
1.525	1.193	0.67	1.505	1.194	0.64

## Краткий анализ результатов и выводы



Расчеты двух ступеней осевого компрессора в пакете *ANSYS CFX-5.7.1* показали большие возможности газодинамического пакета программ *CFX* и позволили определить основные интегральные характеристики (КПД, отношение полного давления и температуры на входе/выходе) и отразить основные локальные особенности турбулентного отрывного обтекания лопаток и дозвукового и сверхзвукового течения в межлопаточных каналах вращающихся и неподвижных элементов ступеней. Численное моделирование показало, что ступень 1 компрессора является трансзвуковой, на поверхности лопаток рабочего колеса и статора возникают локальные сверхзвуковые зоны, диффузорные турбулентные отрывы пограничного слоя и передние “bubbles” с прилипающим отрывом; ступень 2 – сверхзвуковая со сложной системой скачков уплотнения и протяженными отрывными зонами.

Для достижения более точных результатов, более устойчивой работы солвера и получения надежной сходимости необходимо проводить расчеты не на персональном компьютере, а на компьютерном кластере с объемом оперативной памяти 8-10 ГБ, на расчетных сетках с числом узлов 4-5 миллионов.

Результаты, получаемые в программном комплексе *ANSYS CFX*, могут быть непосредственно использованы для проектирования и численных расчетов характеристик дозвуковых и сверхзвуковых осевых компрессоров, турбин и других лопаточных машин.