



Численное моделирование течения вблизи высоконагруженных турбинных профилей при низких числах Рейнольдса методами RANS и LES



А.П. Дубень, Т.К. Козубская
Сектор вычислительной аэродинамики и аэроакустики
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН

О.В. Маракуева, Д.В. Ворошнин
ООО «Нумека», Санкт-Петербург



К.А. Виноградов, К.Р. Пятунин
ПАО «ОДК Сатурн», Рыбинск, Ярославская обл.

Ранее (см. предыдущий доклад) на основе расчетов модельной конфигурации

- решетки лопаток T106C
 - для подхода LES, ПК NOISEtte,
 - и RANS (с использованием модели ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) , RANS LT) , ПК Numeca
- была разработана эталонная вычислительная постановка

Представлены результаты численного исследования лопаточных венцов турбины низкого давления, работающих в условиях низких чисел Рейнольдса

Объект исследования – рабочие лопатки (7-й) ступени высоконагруженной ТНД авиационного ГТД. Рассматриваются:

- упрощённая плоскопараллельная установка (РК7 ПП)
- полная трёхмерная постановка с вращением (7-8 ступени, РК7)

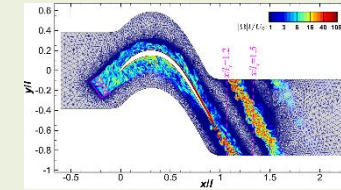
Этапы проведения расчетов

1. РК7 ПП

- формирование эталонных данных

LES

NOISEtte

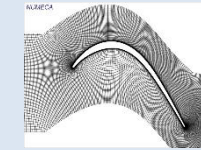


2. РК7 ПП

- выбор оптимальной RANS LT модели

RANS LT

Numeca

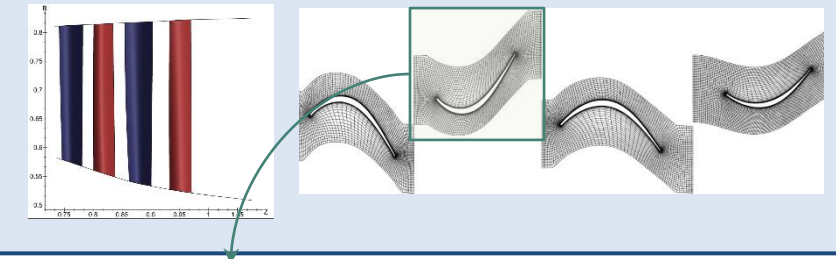


3. Совместный расчет 7-8 ступеней: MP, NLH

- выбор оптимальной постановки для RANS
- формирование нестационарных ГУ для LES

RANS
MP, NLH

Numeca

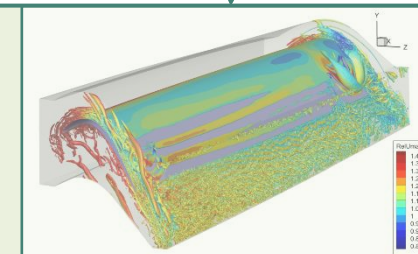


4. Расчет РК7 ступени: WMLES

- выбор оптимальной постановки для RANS

WMLES

NOISEtte

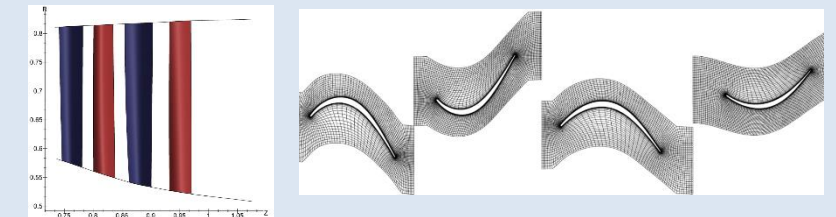


5. Совместный расчет 7-8 ступеней: MP, NLH

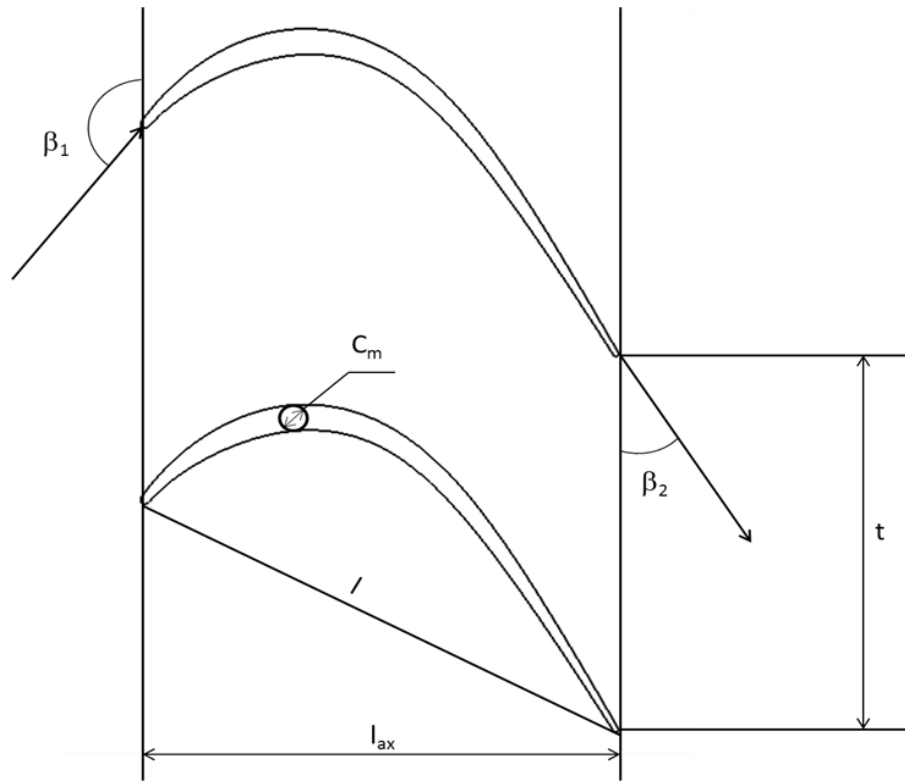
- уточненный расчет

RANS LT
MP, NLH

Numeca



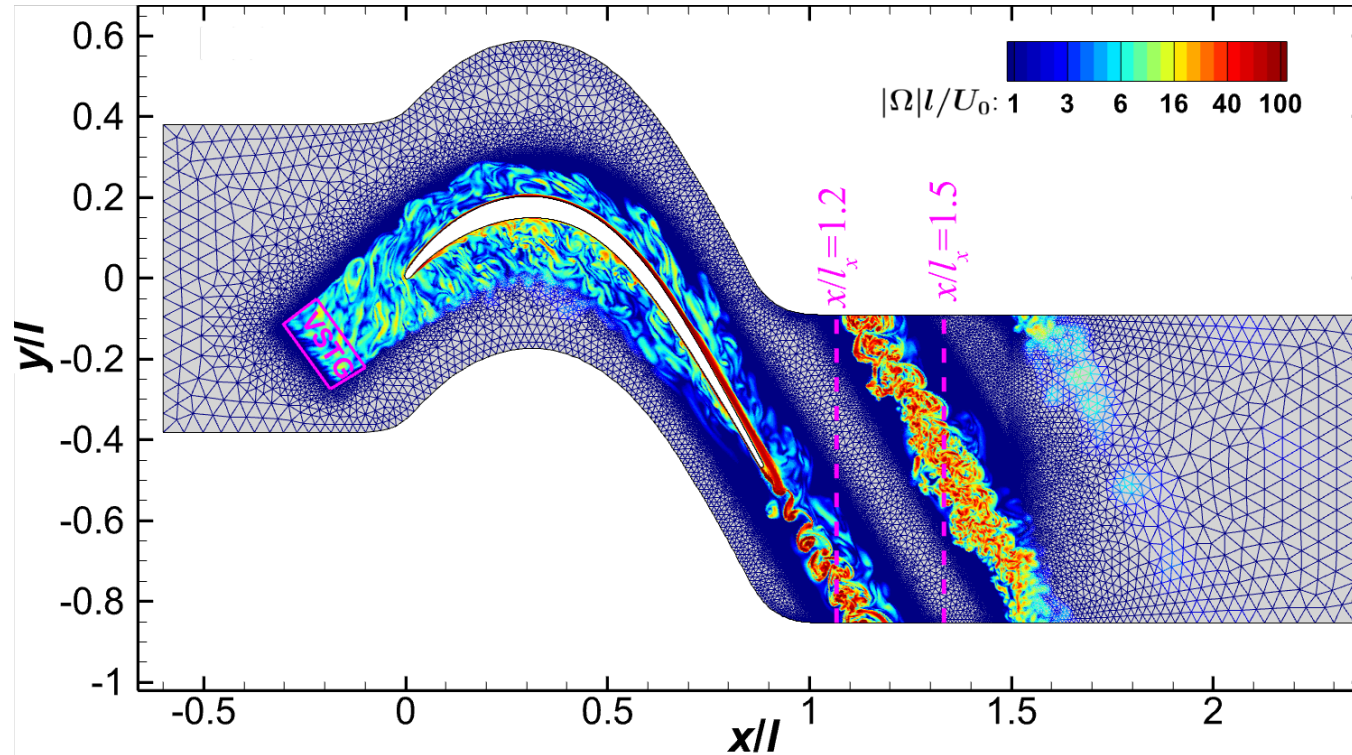
РК7 ПП: физическая постановка задачи



Параметр	Значение
l , мм	39.66
t/l	0.763
l_x/l	0.889
β_{1k} , °	39
β_2 , °	30.5

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$T_{0,in}$, К	728	M_{2th}	0.6865
$P_{0,in}$, Па	62654	Re_{2th}	104433
α_{in} , °	51	ρ_0 , кг/м ³	0.239
k_t , Дж/кг	252	U_0 , м/с	355.14
ω , с ⁻¹	59826	μ_0 , кг/(м·с)	$3.225 \cdot 10^{-5}$
P_{out} , Па	45711	I , %	3.65

PK7 ПП LES NOISette: вычислительная постановка



Подход

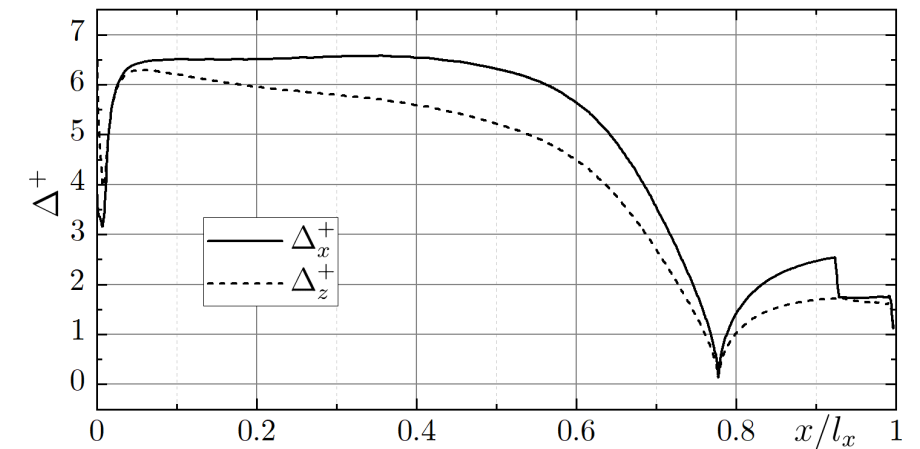
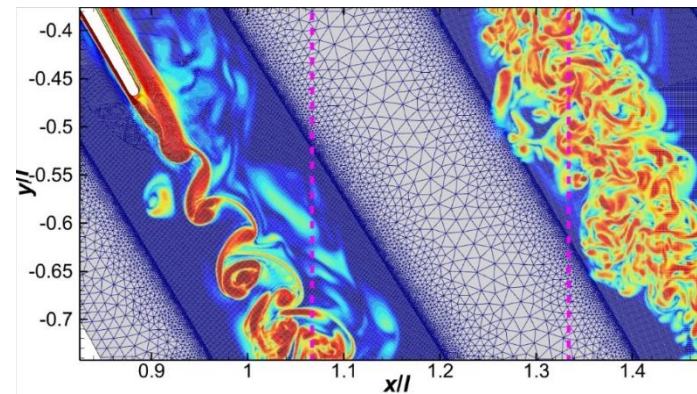
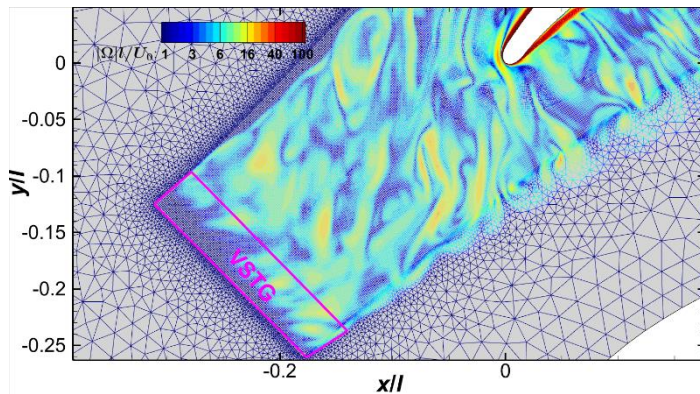
- SA IDDES
- гибридная CD-Upw схема

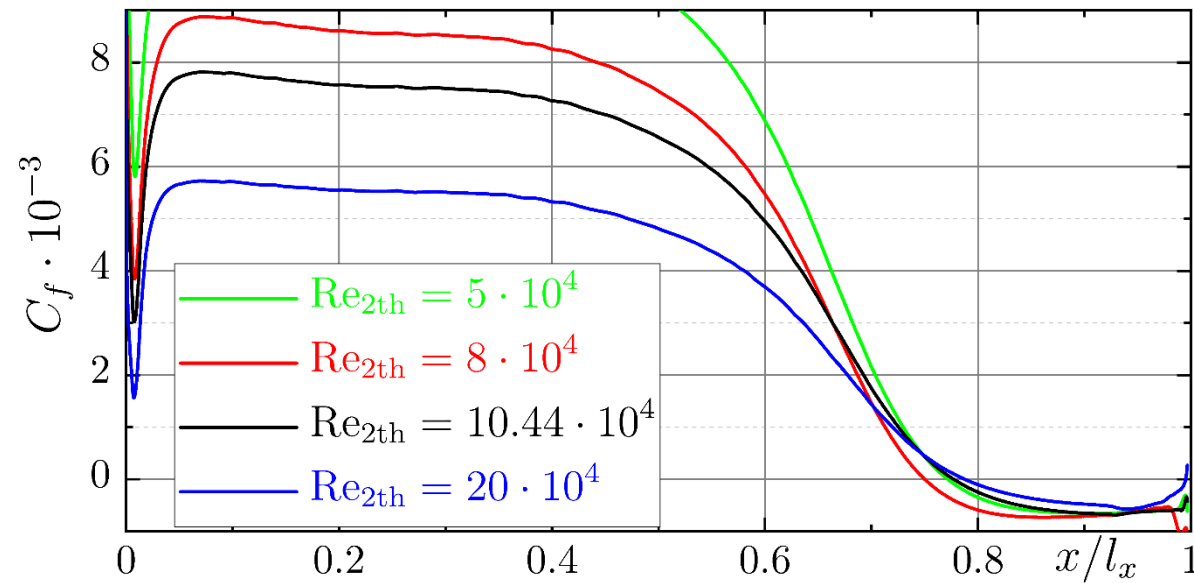
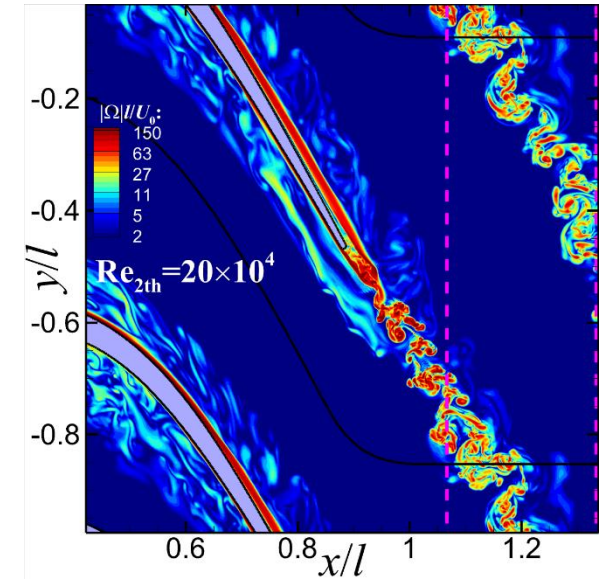
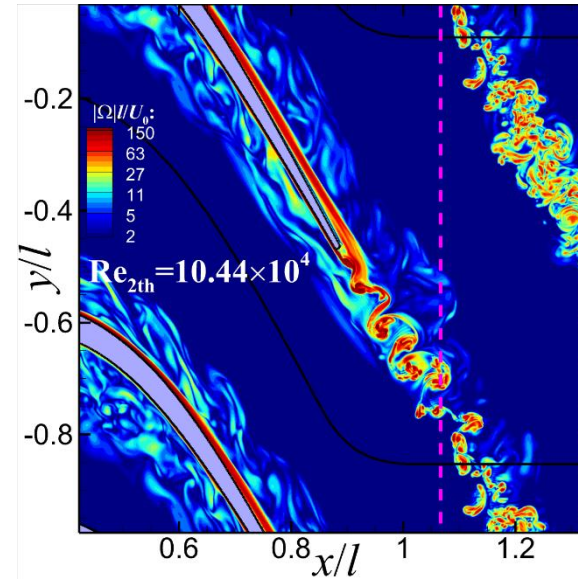
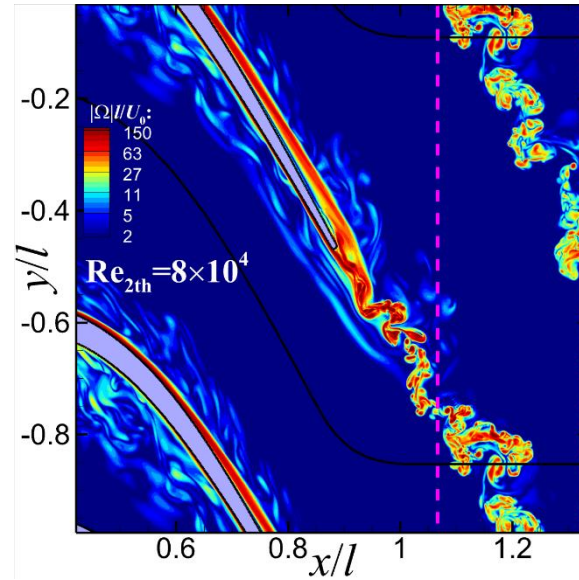
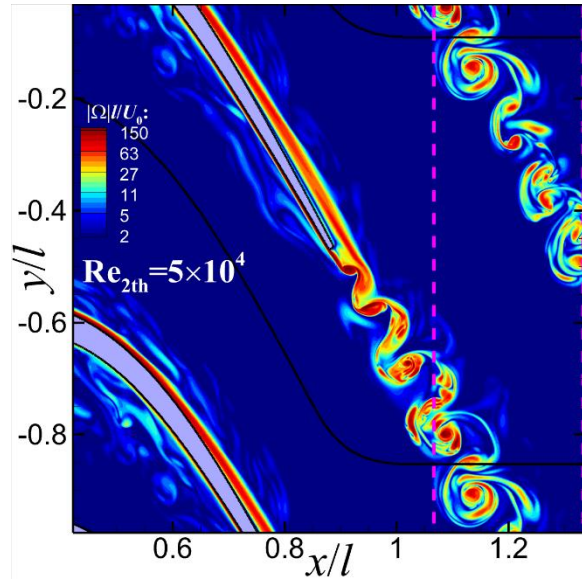
Сетка

- 81.1 млн. узлов, 520 тыс. узлов в 2D сечении
- 150 слоёв по Z
- $\Delta_z = \Delta_{LES} = 10^{-3}l$

Параллельная конфигурация: MPI+OpenMP+OpenCL

3 узла: 2 16CPU Intel Xeon **Gold 6142** (120 GB/s) (16CPU)
4 GPU NVIDIA **V100** (32 GB, 900GB/s)

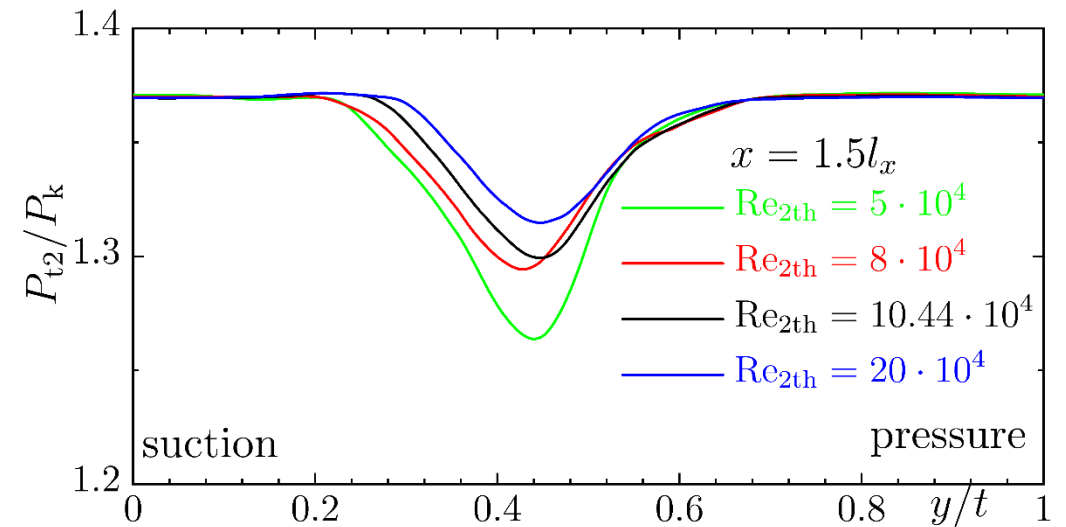
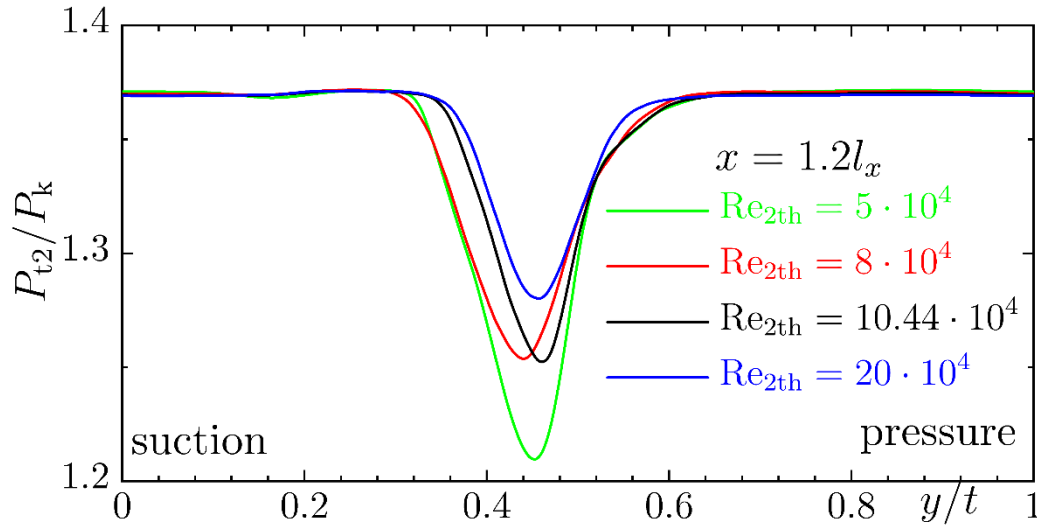
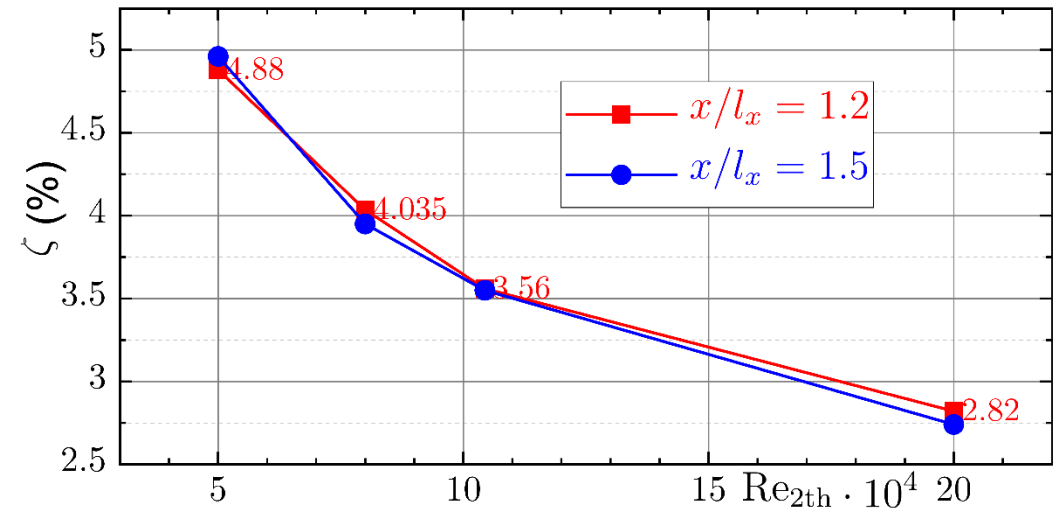
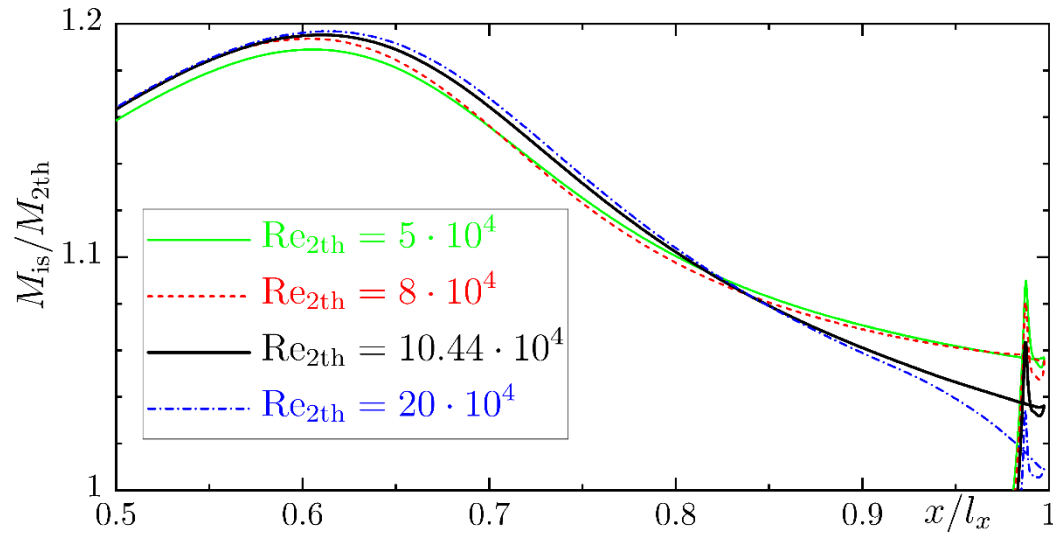


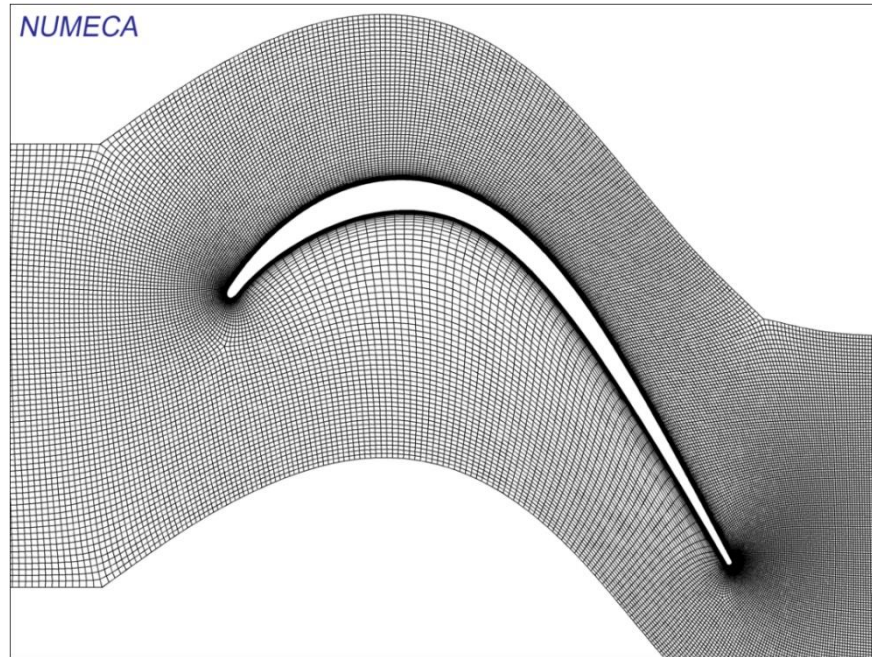


Особенности течения

- ламинарный отрыв без присоединения и турбулизации
- турбулизация в слое смешения – вниз по потоку
- стабильное поведения решения

PK7 ПП LES NOISEtte: результаты расчетов (2/2)



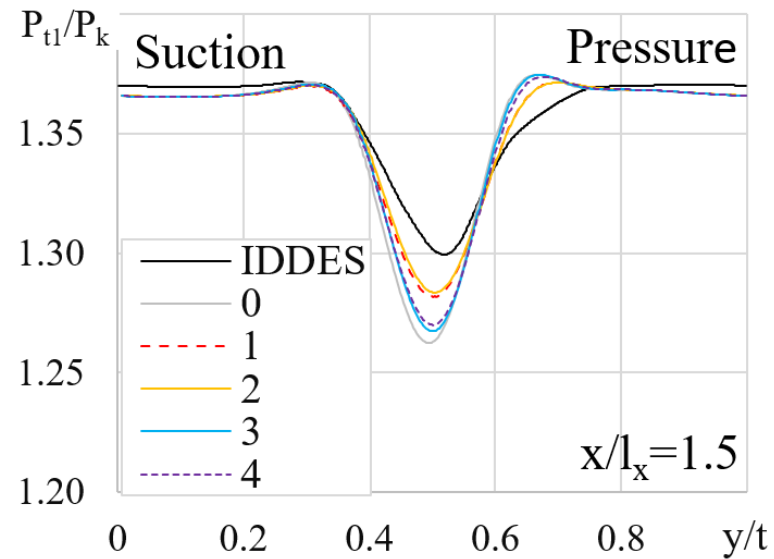
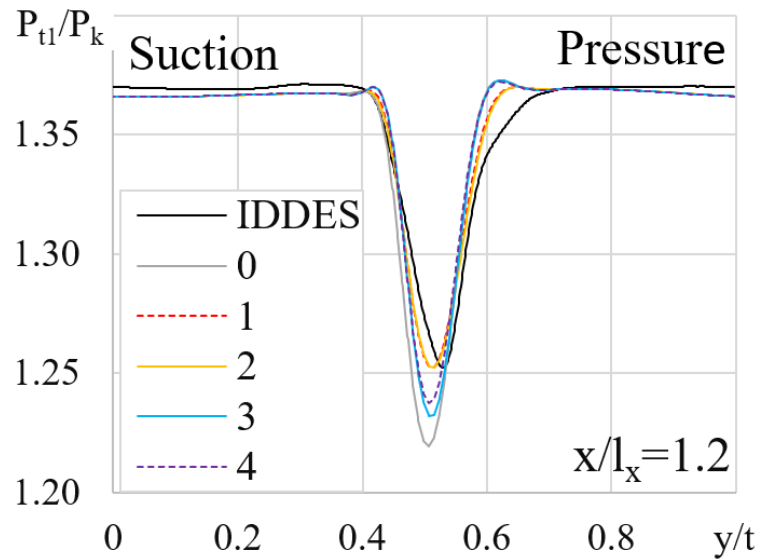
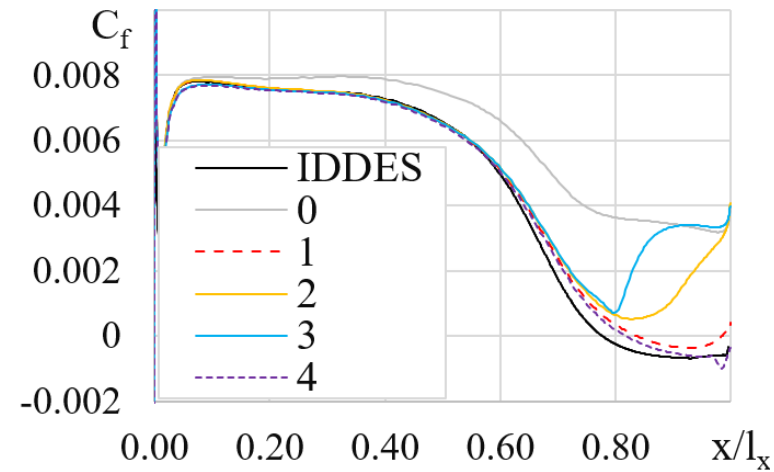
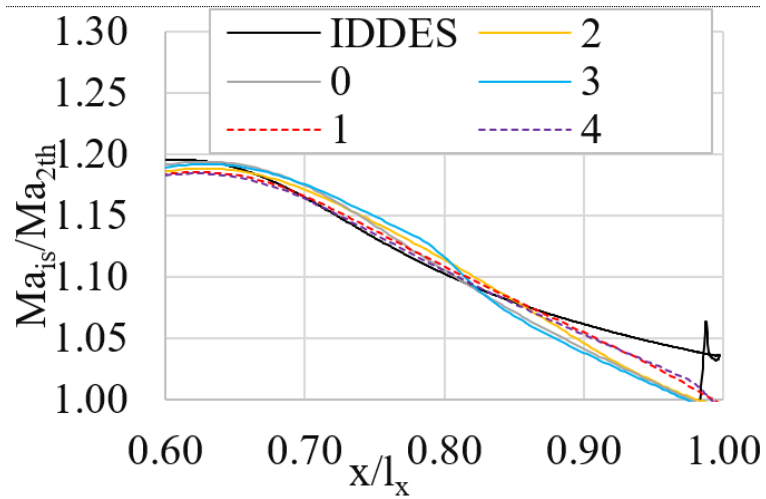


Параметр	Сетка №1
Общее количество узлов, шт	4.9 млн
Количество ячеек по высоте, шт	77
Количество узлов в О-блоке, шт	37
Мин. угол скошенности	52.2°
Макс. коэффициент роста	1.51
Коэффициент роста в пристеночной области	1.0-1.2
Макс. соотношение сторон	755.17
Кол-во ячеек в плоском слое (без входных и выходных блоков), шт	32 тыс.

Модели

- $\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ SST и EARSM Kelterer
- $\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ SST и EARSM Langtry
- AGS SST k и ω
- AGS SST Dhawan&Narasimha (DN)

PK7 ПП RANS LT Numeca: результаты SST



0 – SST

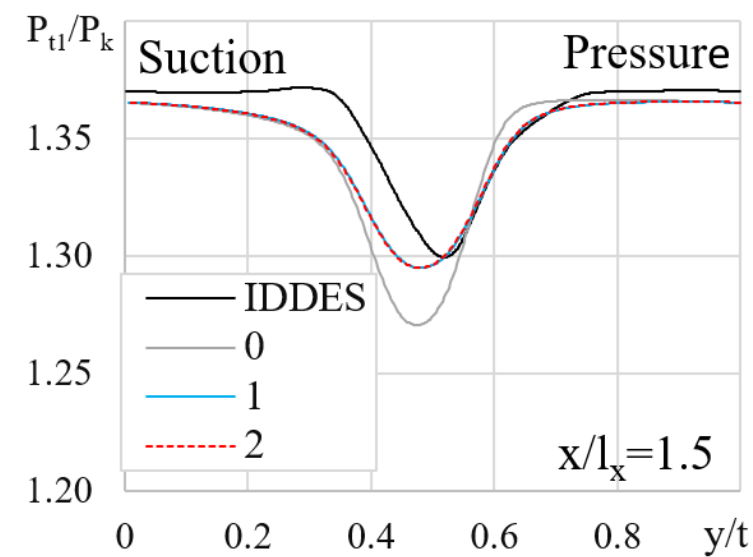
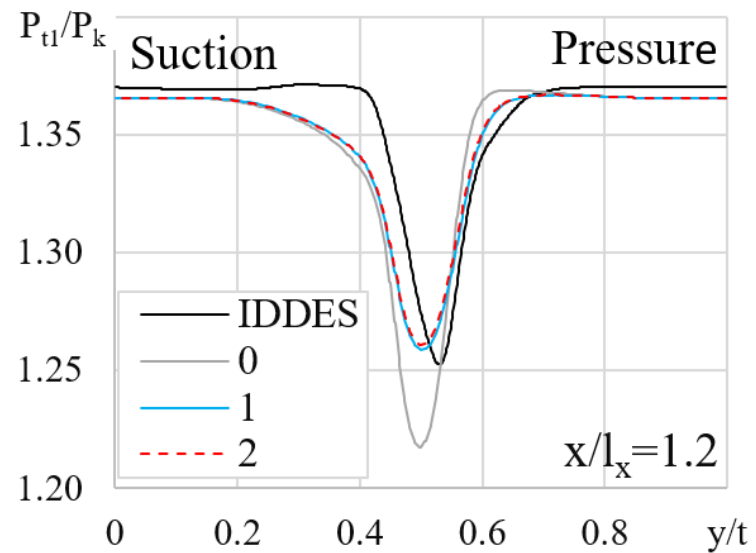
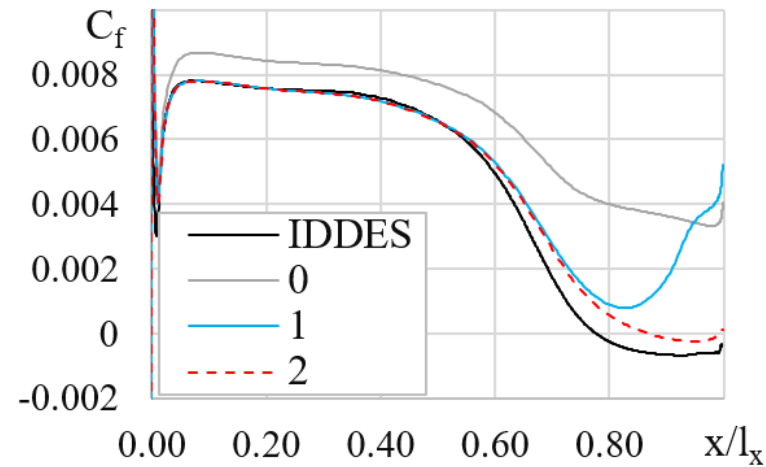
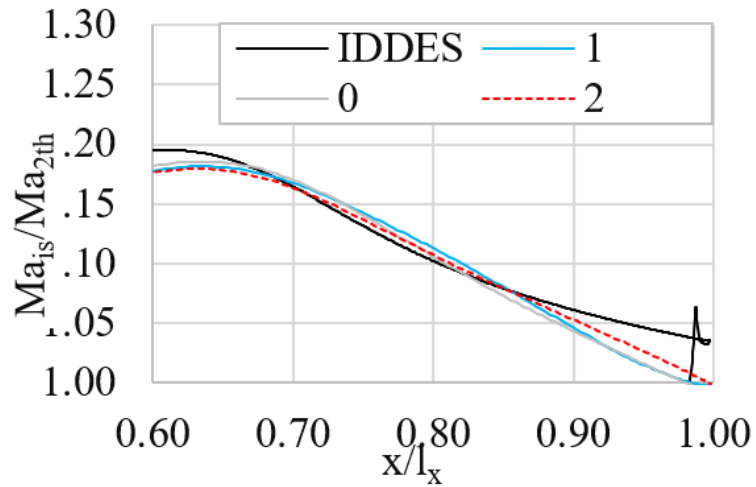
1 – $\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ SST Kelterer

2 – $\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ SST Langtry

3 – AGS SST k и ω

4 – AGS SST Dhawan&Narasimha (DN)

PK7 ПП RANS LT Numeca: результаты EARSМ



0 – EARSМ

1 – $\gamma - \tilde{Re}_{\theta t}$ EARSМ Langtry

2 – $\gamma - \tilde{Re}_{\theta t}$ SST Kelterer

PK7 ПП RANS LT Numeca: ВЫВОДЫ

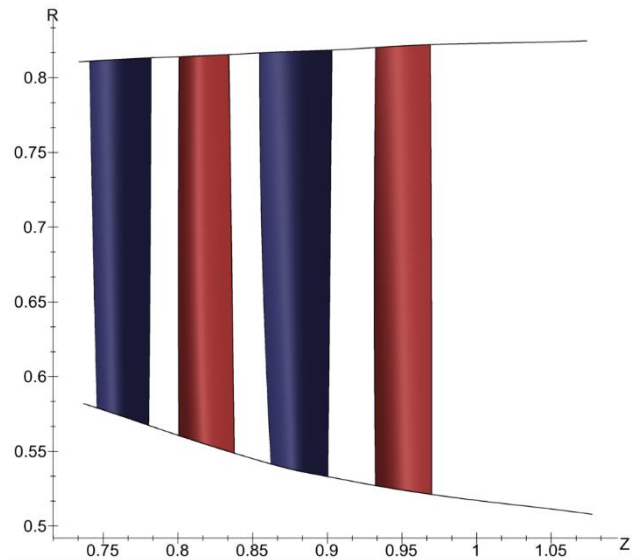
Расчет	ζ , %
IDDES	3.56
SST	3.96
BSL-EARSM	5.68
AGS SST k ω	3.6
AGS SST k ω DN	3.53
$\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ SST Langtry	3.71
$\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ SST Kelterer	3.66
$\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ BSL-EARSM Langtry	5.33
$\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ BSL-EARSM Kelterer	5.24

- наиболее близкая к LES модель: $\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ SST Kelterer
- наиболее близкая из AGS: AGS SST DN
- BSL-EARSM: завышение потерь ввиду завышения уровня турбулентности в ядре потока

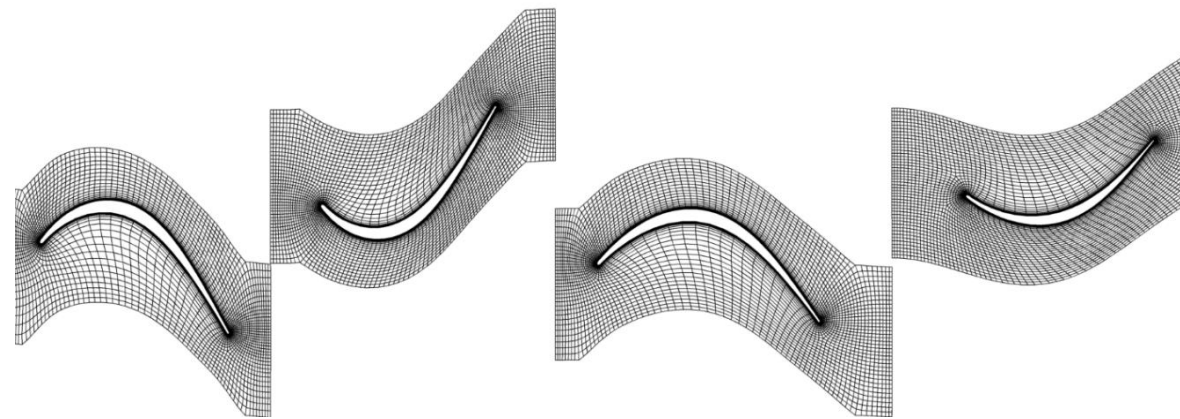
7-8 ступени RANS (MP, NLH) Numeca: постановка задачи

Упрощения постановки:

- без бандажных полок и лабиринтных уплотнений
- В целях экономии вычислительных ресурсов для последующего вихреразрешающего расчета геометрия) лопаток были скорректированы: по 140 на каждом венце



Меридиональный вид 7-8 ступеней



Грубый уровень сетки: каждая 2я сеточная линия

Граничные условия:

- радиальные профили P_{tot} , T_{tot} , k , ω , α и на входе
- P на выходе
- RPM=2173

Расчеты

- 2 сетки: основная и более подробная
- расчеты на исходной и масштабированной геометрии
- SST RANS, RK4, CD схема, мультигрид

Параметры основной сетки:

Параметр	7CA	7PK	8CA	8PK
Общее количество узлов, шт	1.41 млн	1.96 млн	1.59 млн	2 млн
Количество узлов в O-блоке, шт	33	33	33	33
Количество ячеек по высоте, шт	89	89	89	89
Мин. угол скошенности	34°	31°	43.3°	30.6°
Макс. коэффициент роста	1.72	1.55	1.47	1.57
Макс. соотношение сторон	492	535	571	603
Кол-во ячеек в плоском слое (без выходного блока у 8PK), шт	16 тыс.	22 тыс.	18 тыс.	19 тыс.

7-8 ступени RANS (MP, NLH) Numeca: результаты расчетов

Потери кинетической энергии: $\zeta = 1 - \varphi^2$, $\varphi = \frac{w_2}{c_t}$, $c_t = \sqrt{2 \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} RT_{\text{BX}}^* \cdot \left(1 - \frac{P_{\text{ВЫХ}}^*}{P_{\text{ВХ}}^*}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)}$ w_2 - фактическая скорость на выходе,
 c_t - теоретическая

Сеточная сходимость:



Выводы:

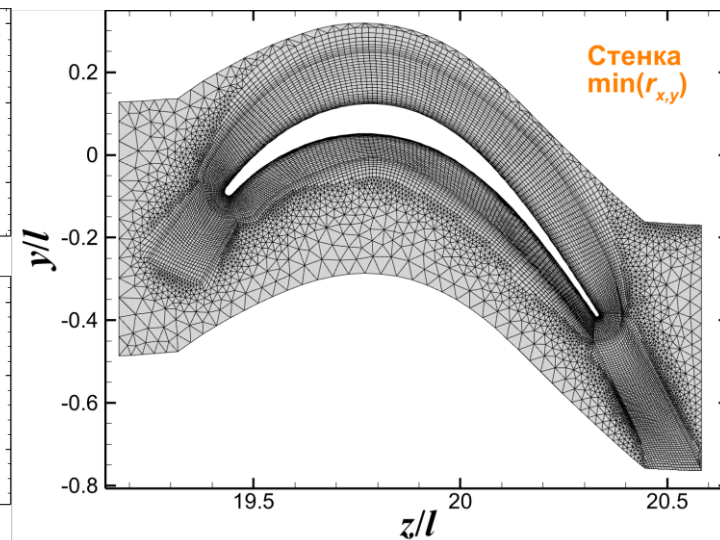
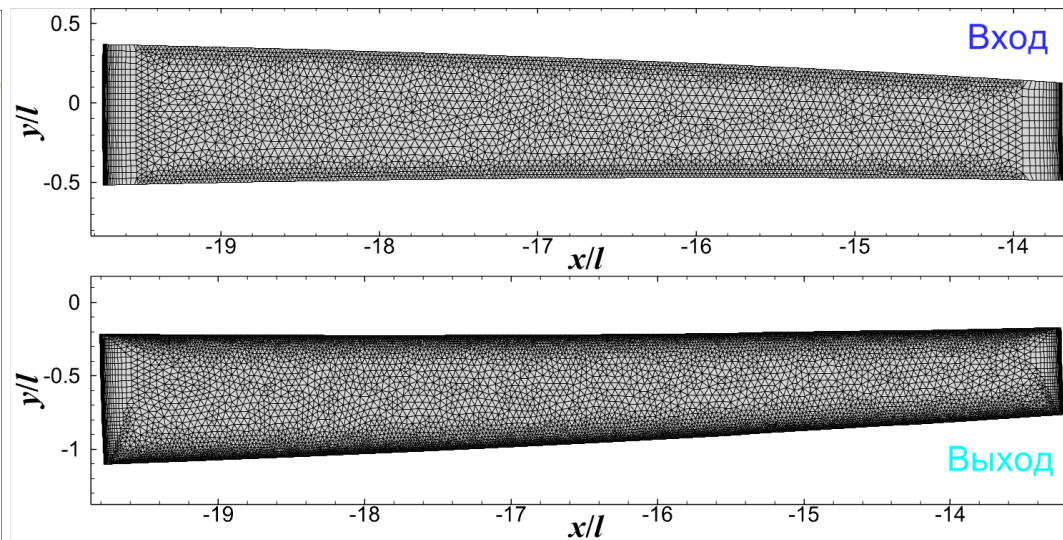
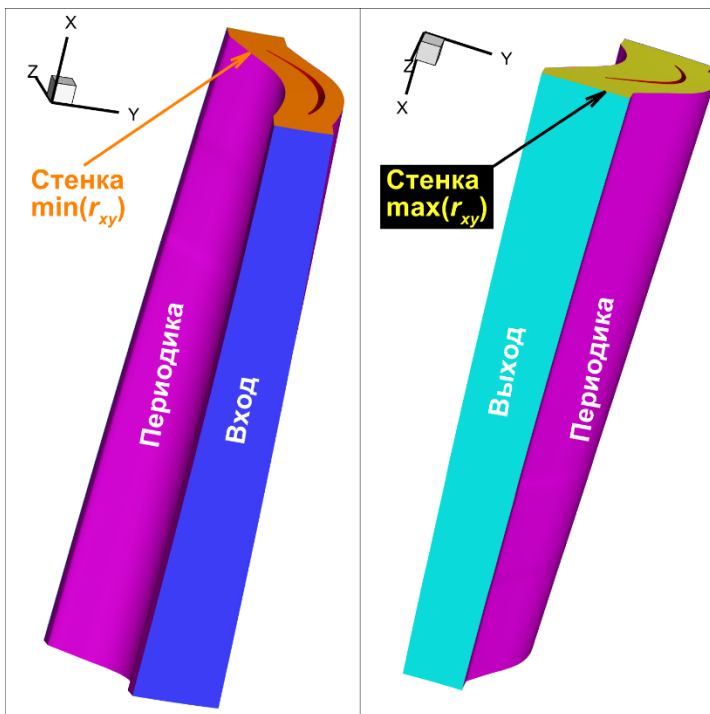
- достаточно проводить расчеты на базовой сетке, NLH с 3 гармониками
- распределение параметров PK7 идентично как в исходной, так и в масштабированной геометрии
- сформированы нестационарные ГУ для вихреразрешающего расчета PK7

Количество гармоник, исходная vs масштабированная геометрия:

	Исходная геометрия			Масштабированная геометрия		
	MP	3h	6h	MP	3h	6h
π^*	0.9887	0.9882	0.9883	0.9888	0.9871	0.9872
G, кг/с	48.808	48.742	48.741	48.817	48.718	48.715



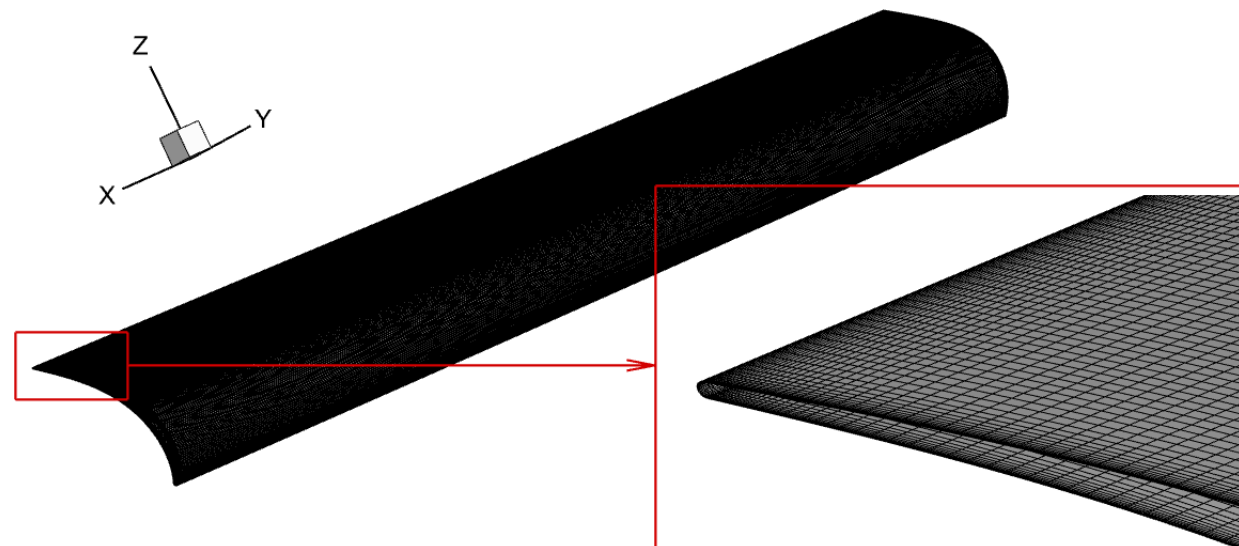
- при переходе от MP к NLH разница в потерях 0.35-0.4%
- при переходе от MP к NLH потери растут
- в исходной геометрии потери больше на 0.2-0.9%, наиболее чувствительная – PK8
- для моделирования достаточно 3х гармоник (NLH)



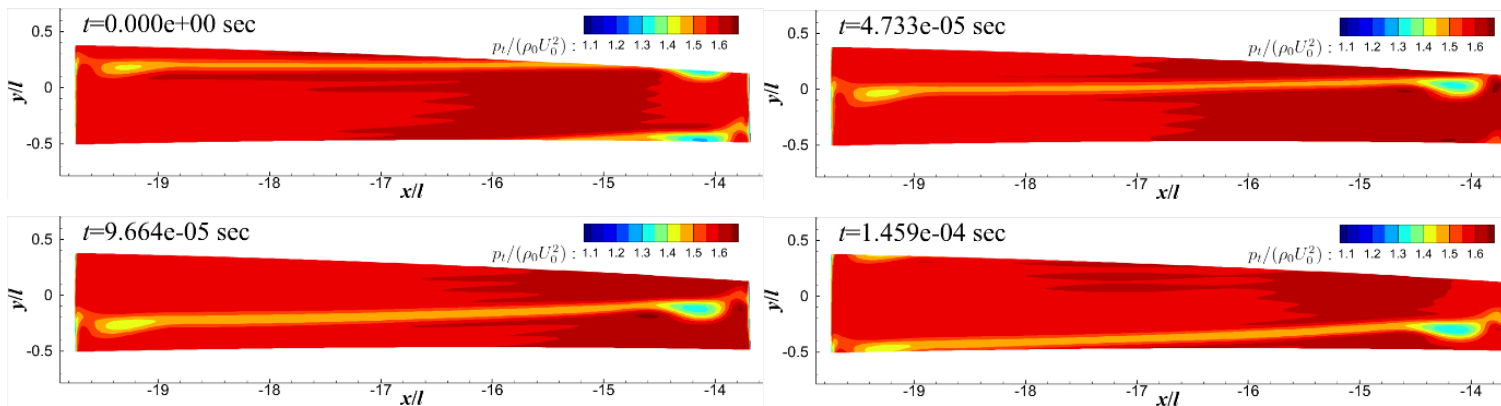
Грубый уровень сетки: каждая 4я сеточная линия

Сетки

- грубая сетка (1) – 9.2 млн узлов (предварительные RANS расчеты)
- вихреразрешающий расчет: 72 млн. узлов (сетка 2)
- последняя – в 4 раза грубее (по каждому направлению), чем требуется для корректного LES



PK7 WMLES NOISEtte: процесс проведения расчетов



Мгновенные значения полного давления на входе PK7 из расчетов Numesa

Граничные условия из расчета Numesa:

- профили (3D) P_{tot} , T_{tot} , k , ω , α и на входе
- профили (3D) P на выходе

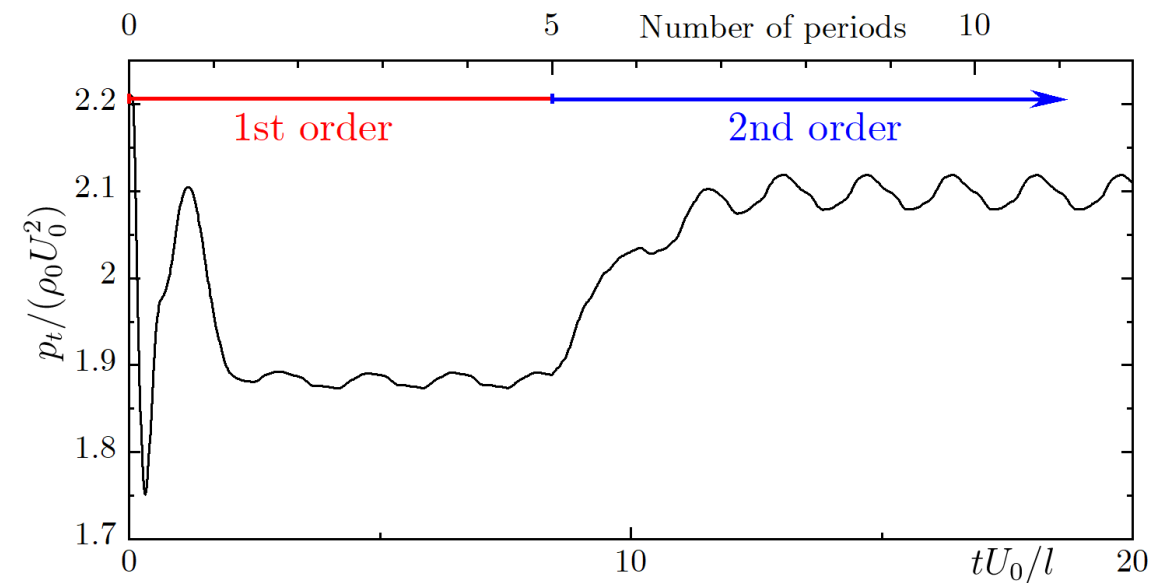
Этапы проведения расчетов

- SA и SST RANS на сетке 1
- переинтерполяция на сетку 2
- вихреразрешающий расчет на сетке 2

Параллельная конфигурация (вихреразрешающий расчет):

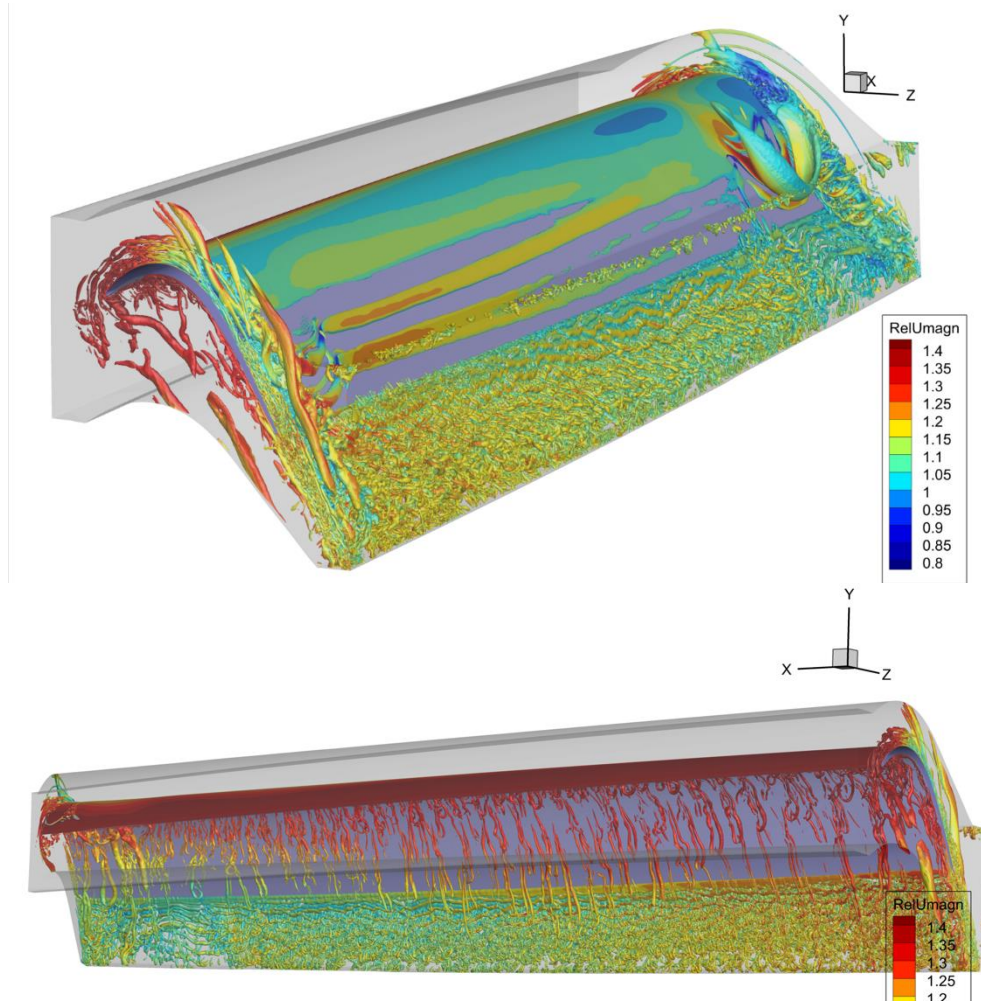
MPI+OpenMP

10 узлов: 2 14CPU Intel Xeon E5-2690 v4 (14CPU+HT)

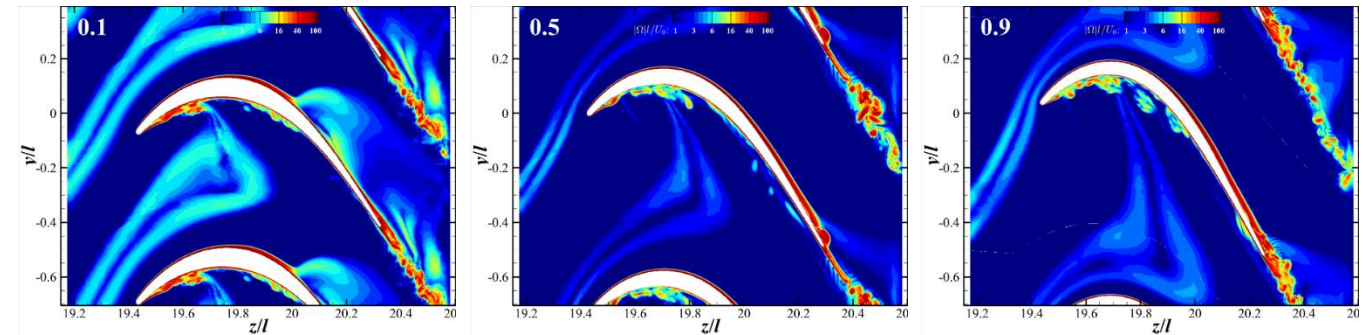
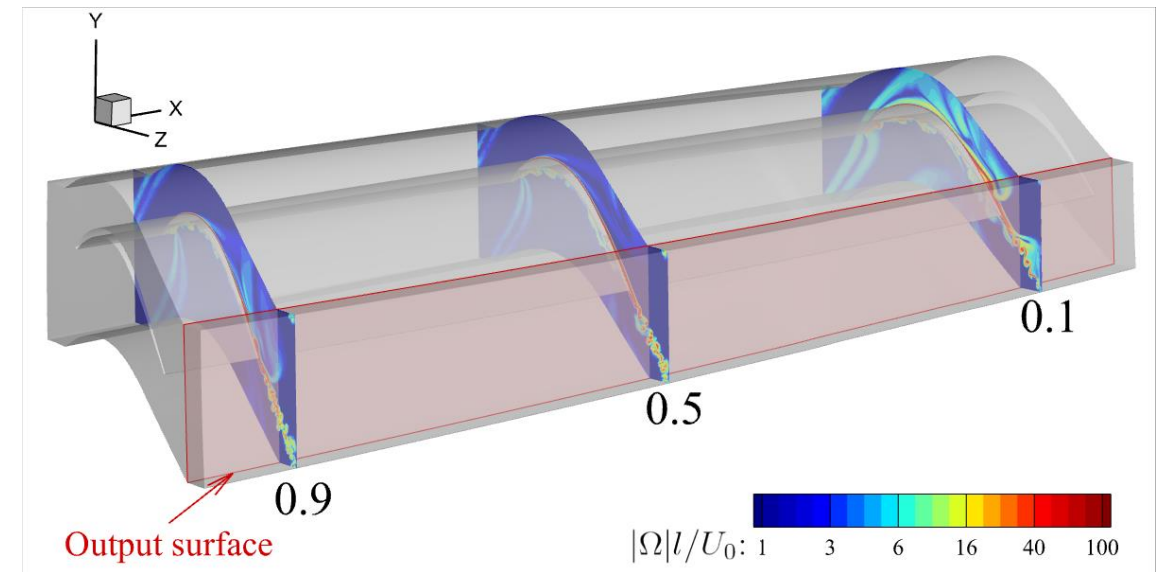


Интегральные значения на выходе PK7 в зависимости от времени
(выход на стационарное решение)

PK7 WMLES NOISEtte: результаты расчетов (1/2)

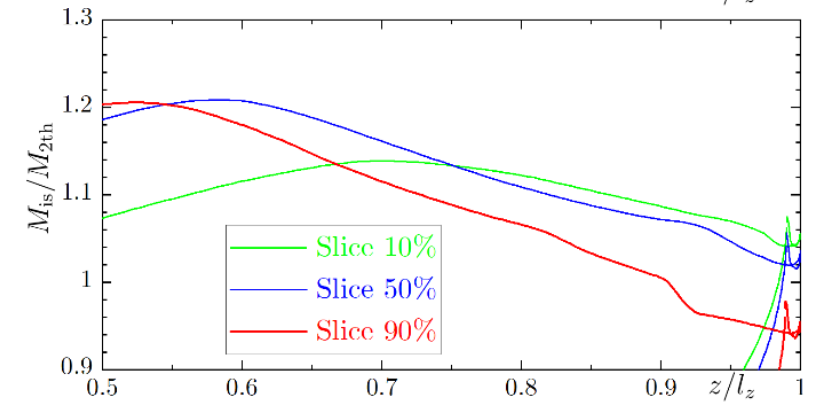
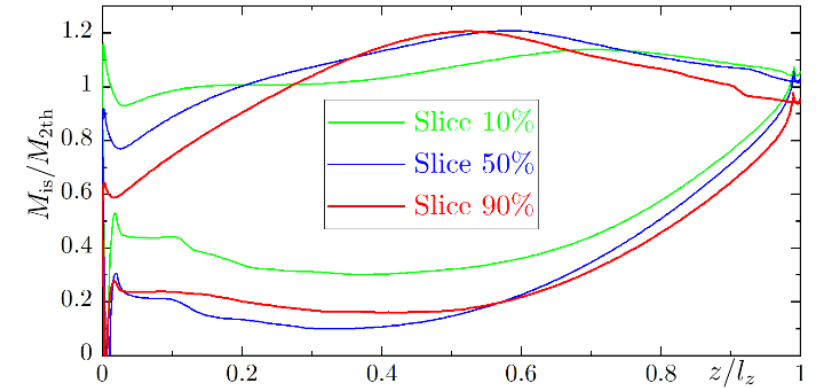
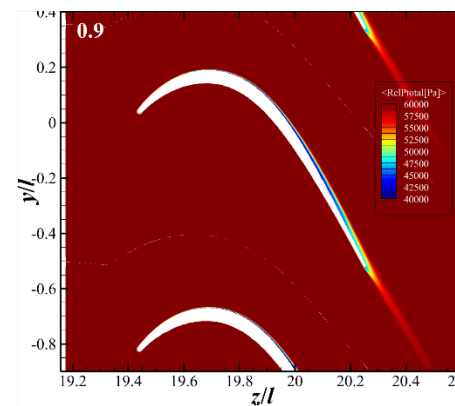
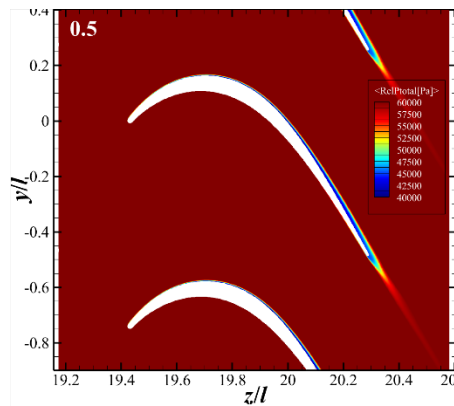
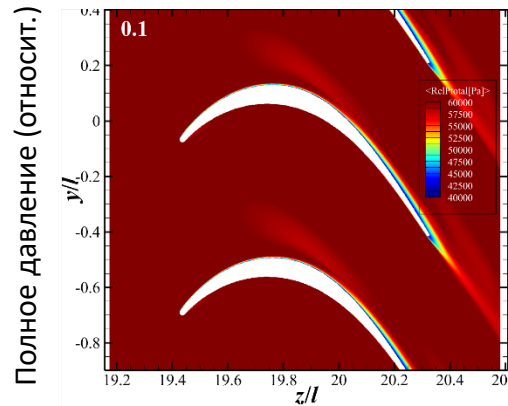
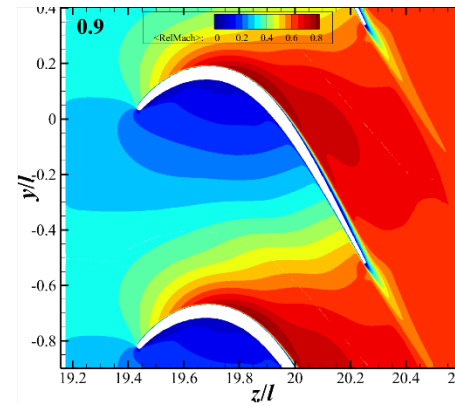
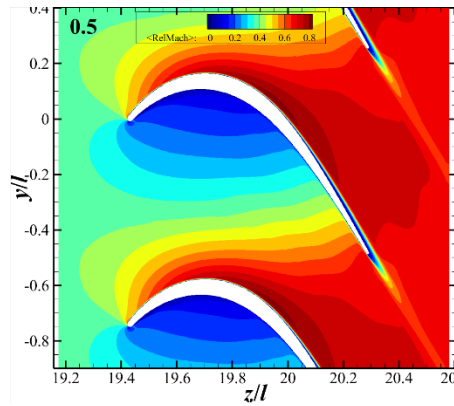
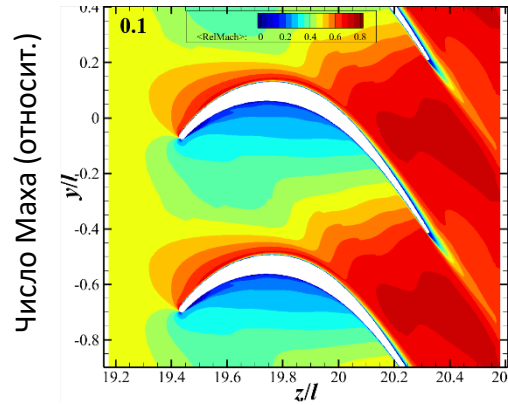


Изоповерхности Q-критерия



- турбулентность перед лопаткой не воспроизводится
 - из-за недостаточно сеточного разрешения
 - требуется его адаптация к нестационарному входному полю

PK7 WMLES NOISEtte: результаты расчетов (2/2)



Профили Ma_{is} по поверхности лопатки

- значения потерь: $\zeta = 4.38\%$ (Numesa NLH: 4.6%)

Сетка 72 млн. узлов (в 4 раза грубее, чем требуется для LES/DNS разрешения):

- шаг по времени $\Delta t \approx 7.7 \cdot 10^{-4} l/U_0$
- 6.27с при задействовании 20 процессоров Intel Xeon E5-2690 v4, 14 CPU + HT
- итого $20 \cdot 14 \cdot 6.27/60/60 = 0.4877$ CPUh
- для получения осредненных характеристик ~5 периодов 1/140 оборота + ~2 на выход на статистически установившийся режим, итого 7 периодов или $1.686 \cdot l/U_0 = 11.8 l/U_0$
- минимальная вычислительная стоимость – 7474 CPUh

Расчет на удовлетворяющей требованиям LES сетке:

- $72 \cdot 4^3 = 4.6$ млрд узлов
- $7474 \cdot 4^3 = 0.478$ млн. CPUh
- только одна лопатка!
- в упрощенной постановке!
- только в случае одинакового количества лопаток на венцах!

RANS

2 ступени, 7 млн узлов

Intel Xeon Platinum 8268

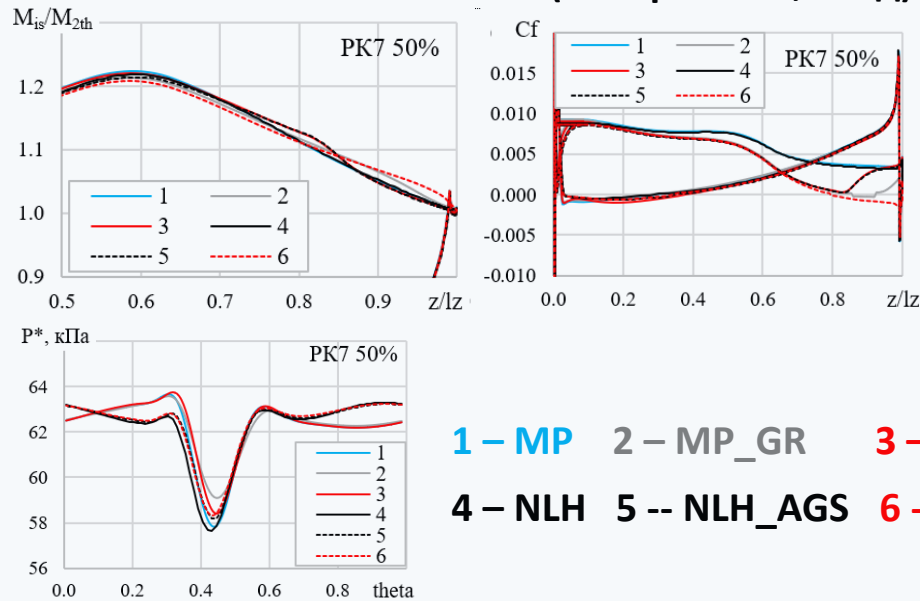
- Mixing Plane $\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ SST ~ **15 мин** на 47 ядрах
- NLH 6 h AGS SST ~ **24 ч** на 14 ядрах
- URANS $\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ SST (~ 500 млн. узлов),
1 оборот – ~ **1 месяц** на 95 ядрах

На данный момент, и на (достаточно) долгие годы вперед, LES/DNS для ТНД в реальной постановке невозможно «Прожигать» зря ресурсы – расточительно и нецелесообразно

Модели

- $\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ SST Kelterer (**GR**): MP
- AGS SST k и ω (**AGS**): MP, NLH
- AGS SST **DW** (плавное переключение γ): MP, NLH

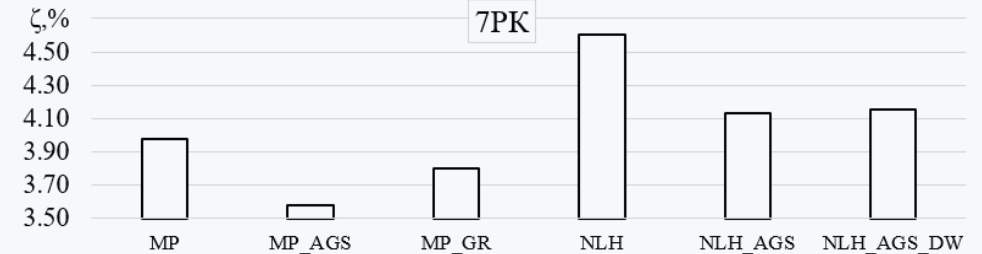
Профили на PK7 (поверхность, след)



1 – MP 2 – MP_GR 3 – MP_AGS
4 – NLH 5 – NLH_AGS 6 – NLH_AGS_DW

- решение сильно зависит от модели
- результаты AGS в MP и NLH на поверхности идентичны
- течение в ПС не зависит от подхода (MP или NLH)

Потери на PK7



- потери сильно зависят от выбранной модели
- КПД (общий и по отдельности) растет относительно полностью турбулентного подхода на 0.5-1.1%
- тенденции для MP и NLH, в целом, схожие
- MP_GR и NLH_AGS_DW предсказывают рост потерь на PK8

Выводы:

- ЛТП возникает во всех венцах
- в PK7 подключение модели ЛТП приводит к уменьшению потерь
- результаты сильно зависят от выбора модели ЛТП
- MP или NLH влияет на след, но не на течение возле поверхности

Заключение

Наиболее эффективным решением, подразумевающим использование вихреразрешающего моделирования для оценки потерь кинетической энергии на выходе ступени ТНД видится следующее

- Расчеты в полной постановке с вращением рационально проводить в рамках подхода RANS с моделью ЛТП
- при этом его параметры целесообразно выбирать на основе дополнительных расчетов упрощенной задачи (плоскопараллельной постановки), для которого в качестве эталонных данных использовать результаты соответствующего вихреразрешающего расчета,
- проведенного с учётом требований и рекомендаций для вычислительной постановки
- для корректного моделирования полной постановки с вращением в рамках LES необходима сетка порядка 5 млрд узлов на одну лопатку
- требуемой точности можно достичь в рамках RANS на существенно меньших по размеру сетках и при задействовании разумных вычислительных ресурсов