



## Возможности и ограничения RANS и LES на примере расчета течения в тестовой решетке T106C



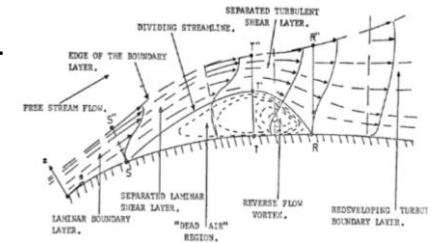
**А.П. Дубень**, Т.К. Козубская  
Сектор вычислительной аэродинамики и аэроакустики  
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН



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

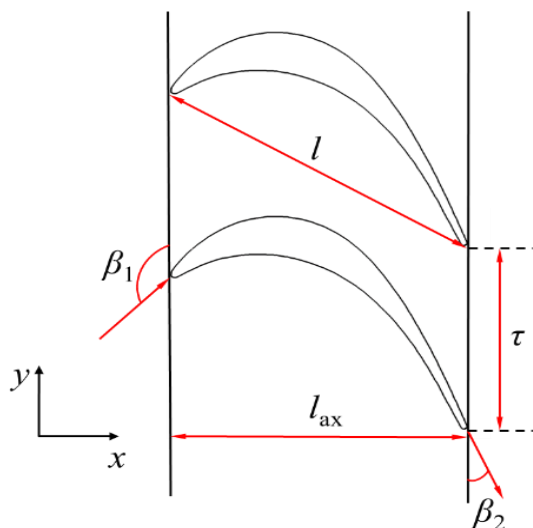
# Введение

- Для снижения массы двигателя проектировщики вынуждены уменьшать количество лопаток в турбине низкого давления (ТНД), при этом сохраняя нагрузку на ступень
- ТНД работает в широком диапазоне чисел  $Re$ , на крейсерском режиме – низкие значения (100 тыс. и меньше)
- В рамках него большая часть пограничного слоя (ПС) ламинарная, на лопатке может образоваться ламинарно-турбулентный (ЛТ) переход
  - чаще всего, вследствие образования локального отрыва ламинарного ПС
- Его корректное воспроизведение с помощью численного моделирования – сложная задача
  - как для RANS учитывающих ЛТ переход (т.к. модели ЛТП эмпиричны)
  - так и для LES/DNS (ооочень дорого)
- На примере турбинной высоконагруженной решетки лопаток T106C проводится исследование возможностей и ограничение и оценка требований RANS и LES/DNS для корректного предсказания потерь полного давления возле лопаток ТНД



# T106C: физическая постановка задачи

**Эксперимент:** Stotz, S., Guendogdu, Y., and Niehuis, R. Experimental Investigation of Pressure Side Flow Separation on the T106C Airfoil at High Suction Side Incidence Flow // ASME. J. Turbomach., 2017, 139(5): 051007



Параметр	Обозначение	Величина
Теоретическое число Маха на выходе	$Ma_{2th}$	0.65
Хорда	$l$	100 мм
Осевая хорда	$l_{ax}$	85.9 мм
Относительный шаг	$t/l$	0.95
Входной угол потока	$\beta_1$	127.7°
Выходной угол потока	$\beta_2$	29.4°

$$Re_{2th} = \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \frac{l}{C_s} \frac{Ma_{2th} P_k \left[ T_{t1} / (1 + 0.5(\gamma - 1) Ma_{2th}^2) + S \right]}{\left[ T_{t1} / (1 + 0.5(\gamma - 1) Ma_{2th}^2) \right]^2}$$

$$Ma_{2th} = \left\{ \frac{2}{\gamma - 1} \left[ \left( P_{t1} / P_k \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \right\}^{1/2}$$

## На входе:

- полная температура  $T_{t1} = 303.15$  К;
- интенсивность турбулентности  $Tu = 3$  %;
- масштаб вихря  $\Lambda = 20$  мм.

## Режимы обтекания

$Re_{2th} \cdot 10^4$	$P_{t1}$ , Па	$P_k$ , Па
9	7860.8	5900
20	17467	13110
50	43667.6	32775

$P_{t1}$  – полное давление на входе;

$P_k$  – статическое давление на выходе;

$C_s$  и  $S$  – константы закона Сазерленда для динамической вязкости;

$R = 287,3$  Дж/кг·К,  $\gamma = 1.4$  – газовая постоянная и показатель адиабаты для воздуха соответственно.

# T106C: экспериментальные данные

$$Ma_{is} = \left\{ \frac{2}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P_{t1}}{P_k} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \right\}^{1/2}$$

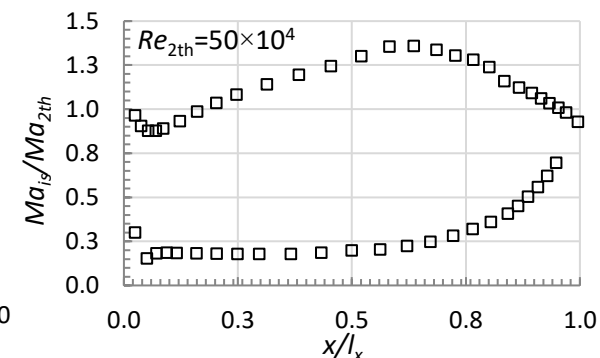
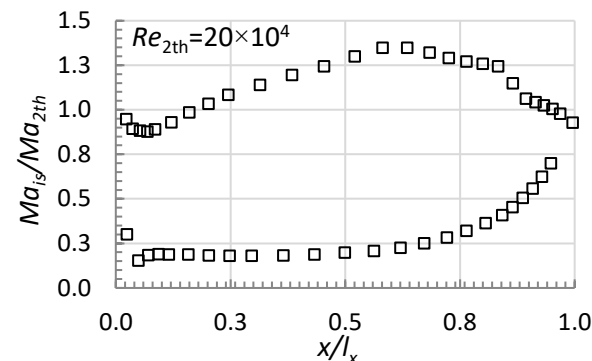
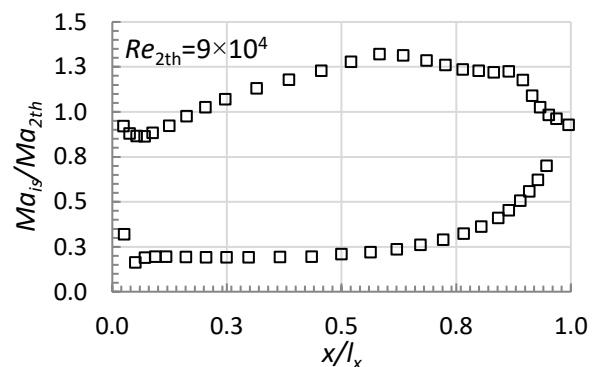
$$\gamma = 1.4$$

$$\zeta = \frac{P_{t1} - P_{t2}}{P_{t1} - P_k} \cdot 100\%$$

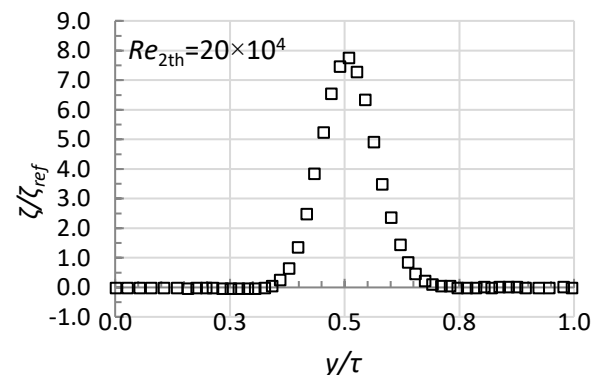
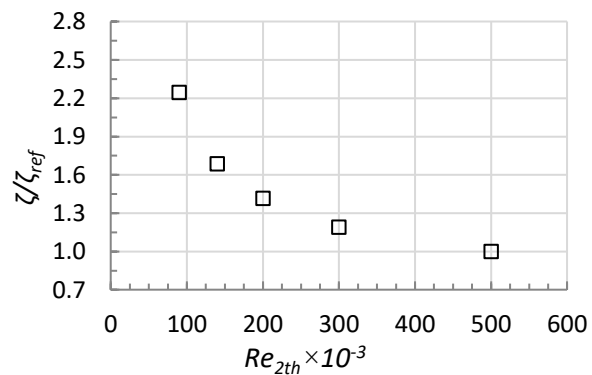
$\zeta_{ref}$  – потери при  $Re_{2th} = 50 \cdot 10^4$

Сечение  $x/l_x = 1.4$

## Профили на поверхности лопатки



## Профили на выходе



Экспериментальное значение  $\zeta_{ref}$  не известно (данные закрыты)

# Кратко о подходах RANS, (WR)LES, WMLES

## RANS

Reynolds Averaged Navier-Stokes

- $\Delta_{wn}^+ < 1$
- разрешение градиентов вдоль стенки

## LES (WRLES)

Large Eddy Simulation  
Wall-Resolved LES

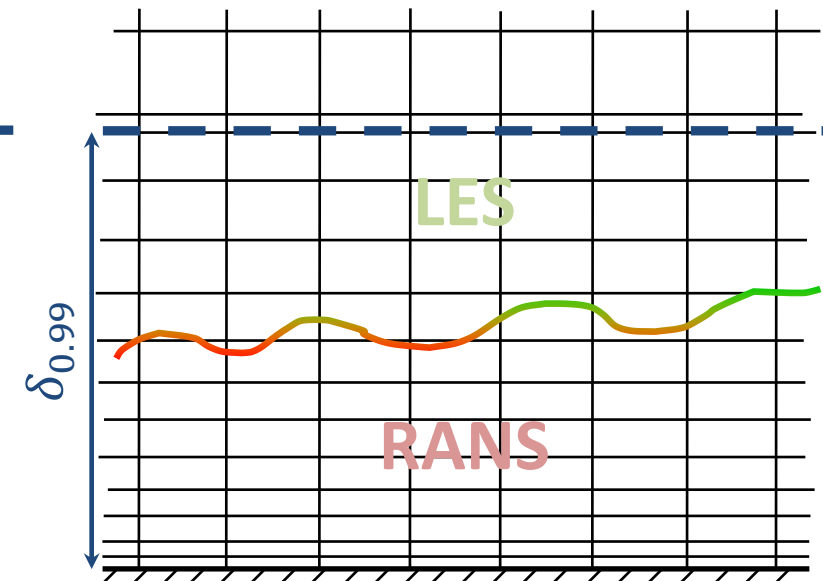
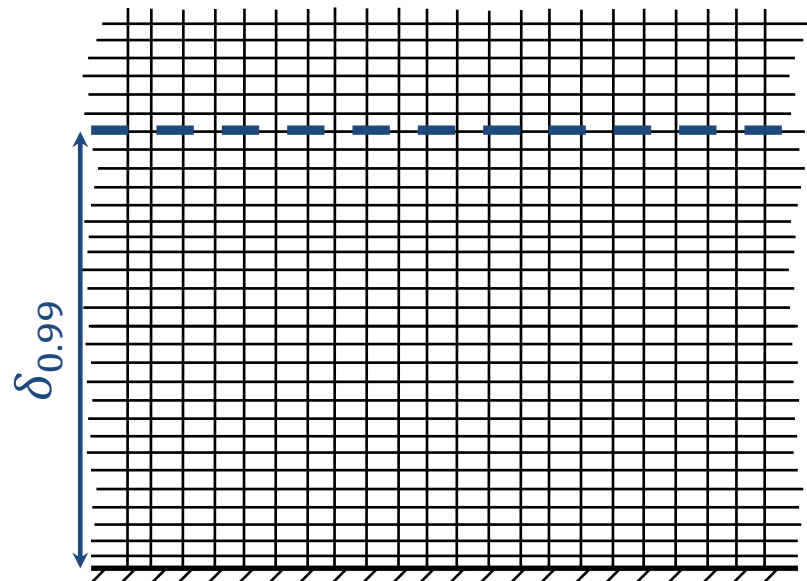
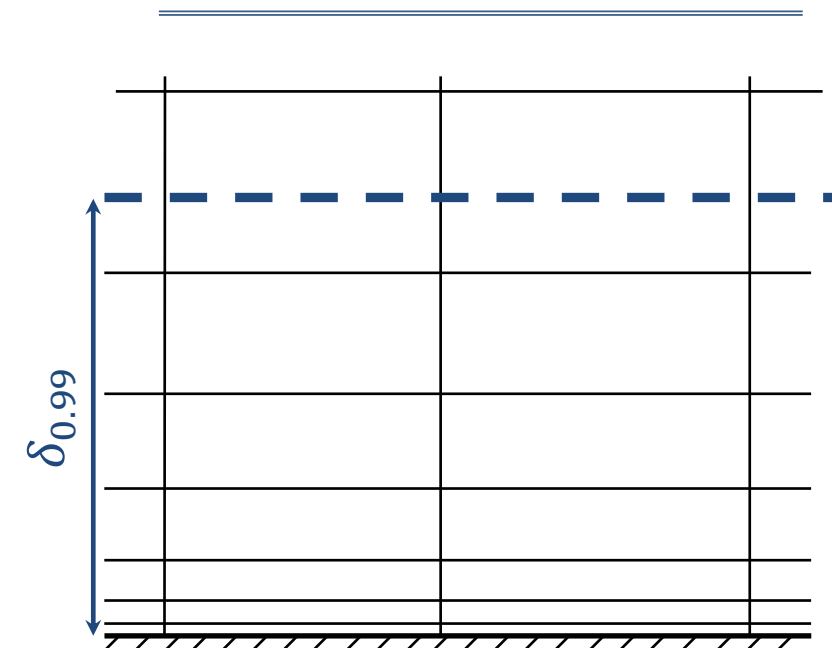
Подход	$\Delta_x^+$	$\Delta_z^+$
LES	40	20
LES с подробный разрешением	20	10
DNS	15	10
DNS с подробным разрешением	10	7

## WMLES

Wall-Modelled LES

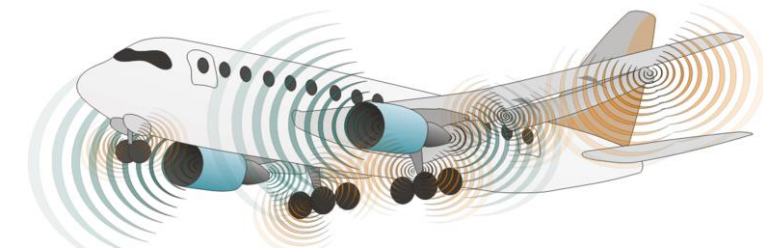
IDDES:

- $\Delta_x \leq \delta_{0.99}/10$
- $\Delta_z \leq \delta_{0.99}/20$

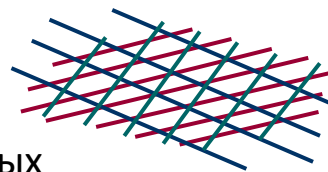


# NOISEtte: описание вихреразрешающего алгоритма

- Вихреразрешающий гибридный RANS-LES метод **IDDES** последней модификации [1]
  - адаптивное переключение между RANS, (WR)LES и WMLES в зависимости от сеточного разрешения и условий течения
  - адаптивный подсеточный масштаб  $\Delta_{SLA}$
- Турбулентный контент на входе
  - генератор синтетической турбулентности **STG** [2]
  - в виде объемного распределенного источника **VSTG** [3]



- Вершинно-центрированная **EBR** схема повышенной точности
  - второй порядок точности на произвольных неструктурированных сетках в рамках конечно-объемного подхода
  - 5-6 порядок точности на сетках типа равномерных решёток (трансляционно-инвариантные сетки)
  - **гибридная CD-Upwind-WENO** схема, веса адаптивно выбираются в зависимости от локальных особенностей течения



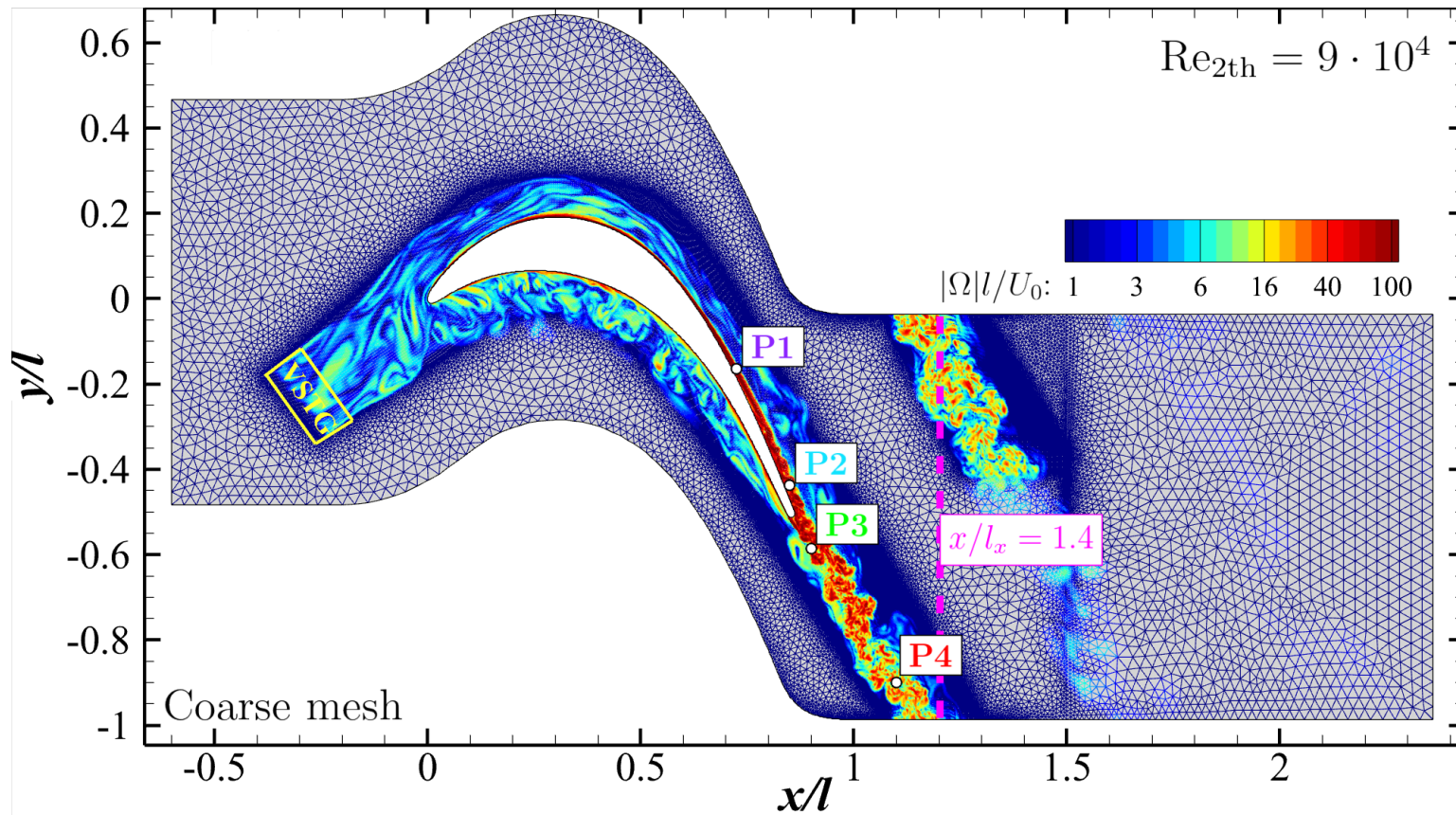
- Интегрирование по времени
  - неявная схема на основе Ньютоновских итераций
  - метод бисопряженных градиентов (BCGStab)
  - $CFL_{max}=10$

<sup>1</sup> E. Guseva, A. Garbaruk, and M. K. Strelets, "Assessment of Delayed DES and Improved Delayed DES Combined with a Shear-Layer-Adapted Subgrid Length-Scale in Separated Flows," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 98, pp. 481-502, 2017.

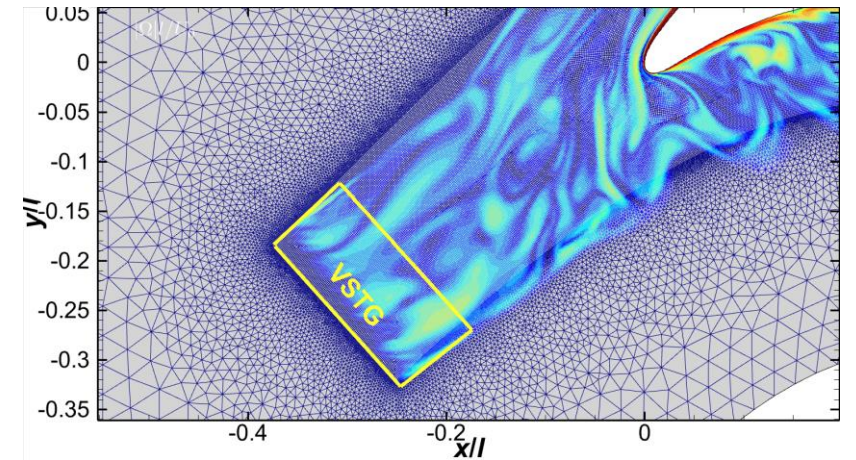
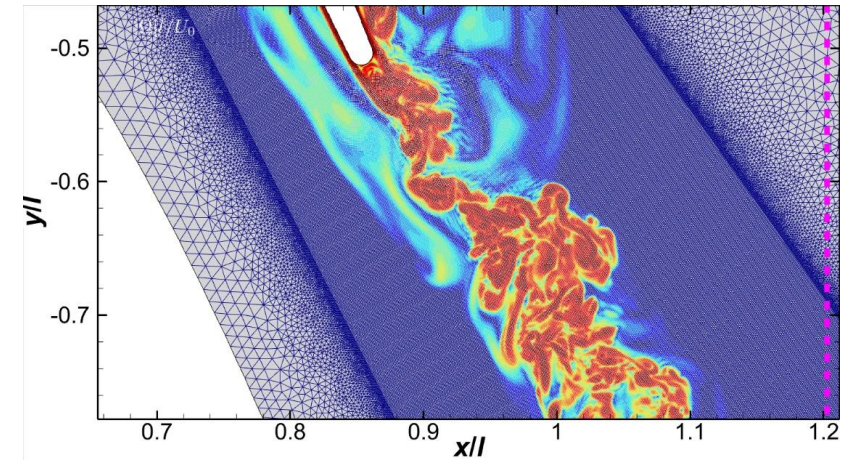
<sup>2</sup> M. Shur, P. Spalart, M. Strelets, and A. Travin, "Synthetic Turbulence Generators for RANS-LES Interfaces in Zonal Simulations of Aerodynamic and Aeroacoustic Problems," *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 93, pp. 63-92, 2014.

<sup>3</sup> M. Shur, M. Strelets, A. Travin, A. Probst, S. Probst, D. Schwamborn, S. Deck, A. Skillen, J. Holgate, and A. Revell, "Improved Embedded Approaches," *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, vol. 134, pp. 65-69, 2017.

# Сетки для IDDES расчетов (1/2)



Вычислительный домен 2D, ребра сетки *coarse*

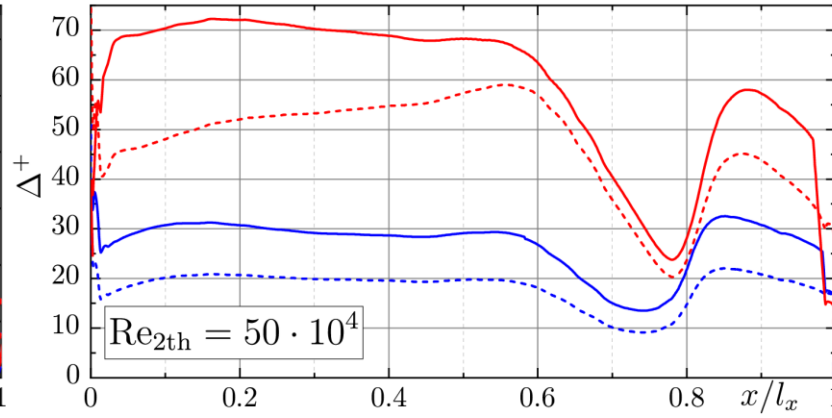
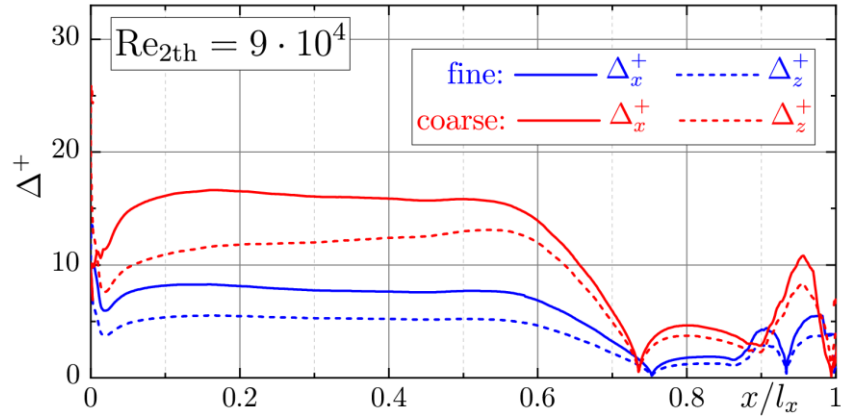


Фрагменты сетки *fine*

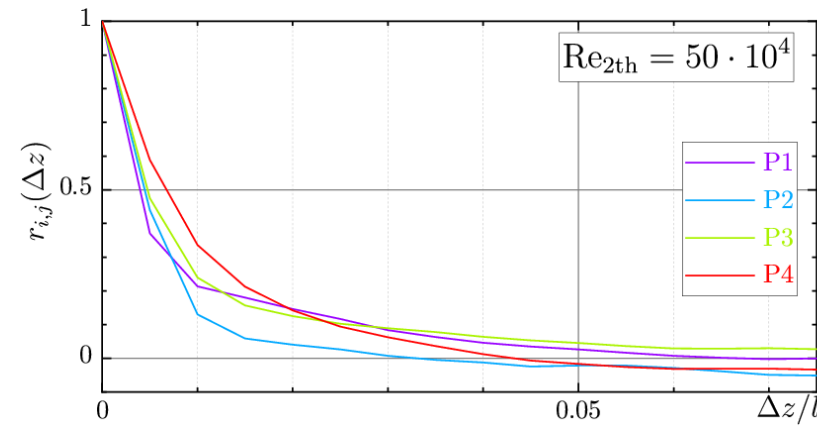
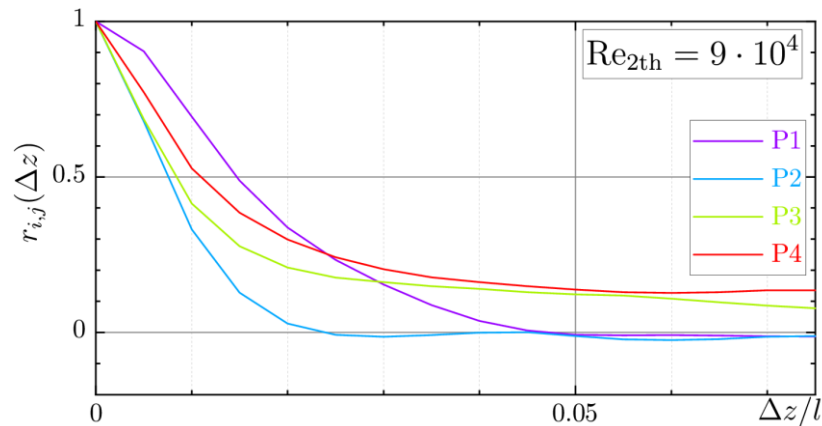
Сетка	$N_{nz} \cdot 10^6$	$N_{n,2D} \cdot 10^3$	$N_z$	$\Delta_\tau/l$	$\Delta_{sl}/l$	$\Delta_z/l$
<i>fine</i>	83.2	533	151	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$
<i>coarse</i>	10.2	127.9	75	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Размер домена по размаху:  $L_z = 0.15l$

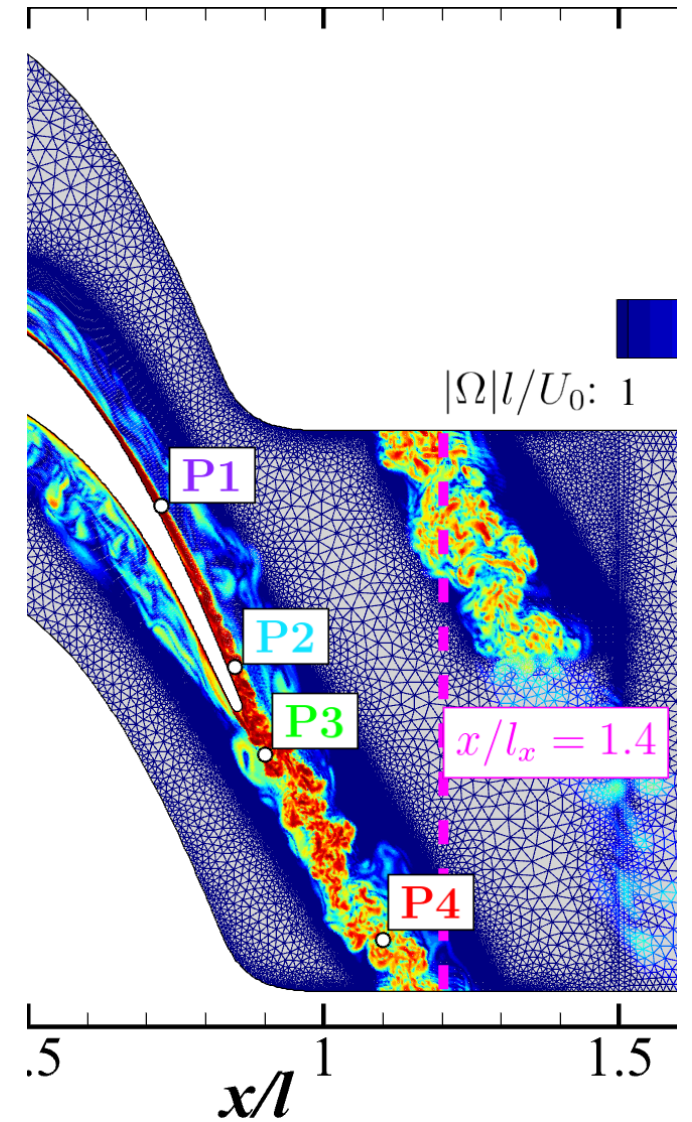
# Сетки для IDDES расчетов (2/2)



Шаги сетки вдоль лопатки (на стороне разряжения) в переменных закона стенки

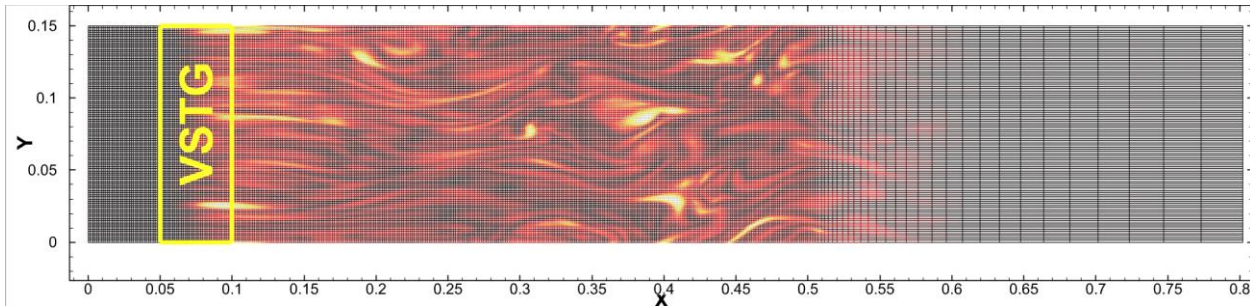


Корреляционный коэффициент в точках P1-P4



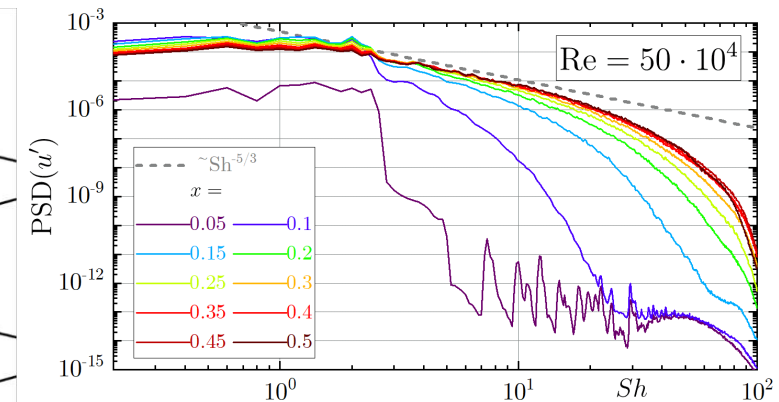
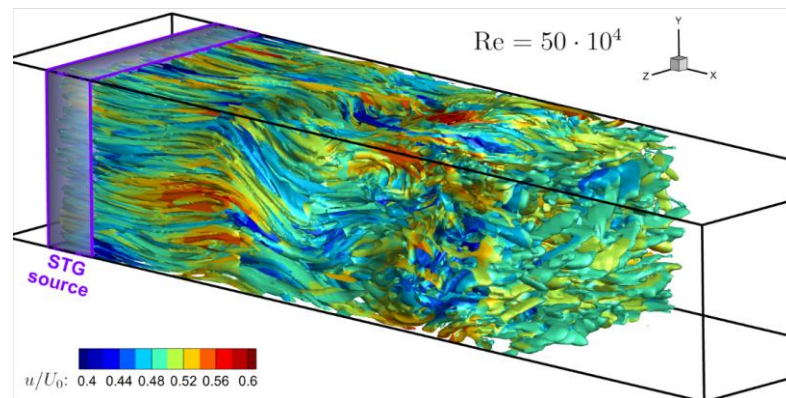
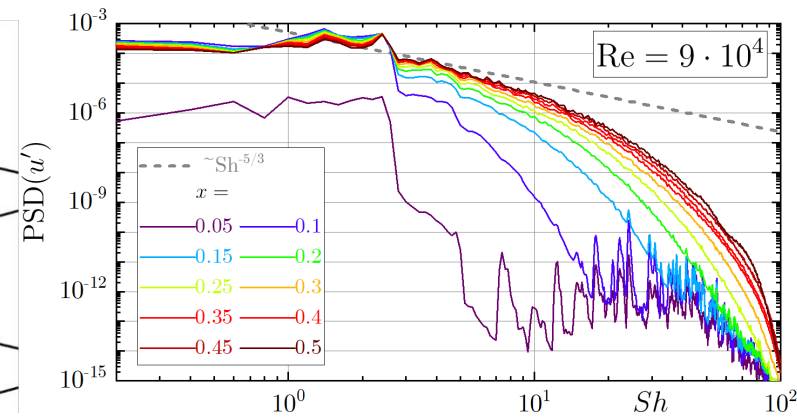
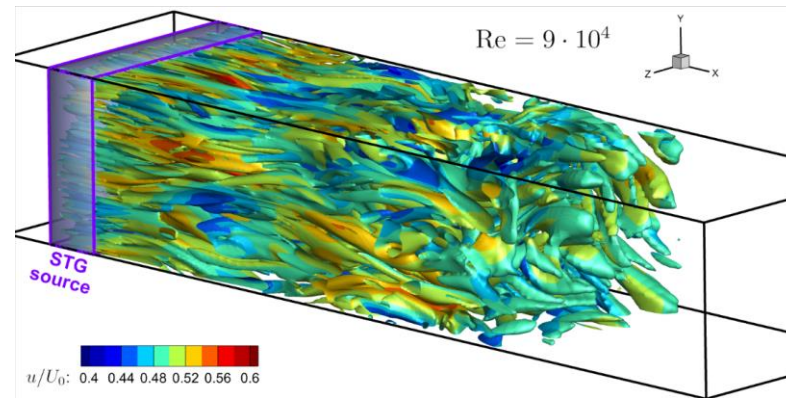


# IDDES: источник турбулентных пульсаций (VSTG)

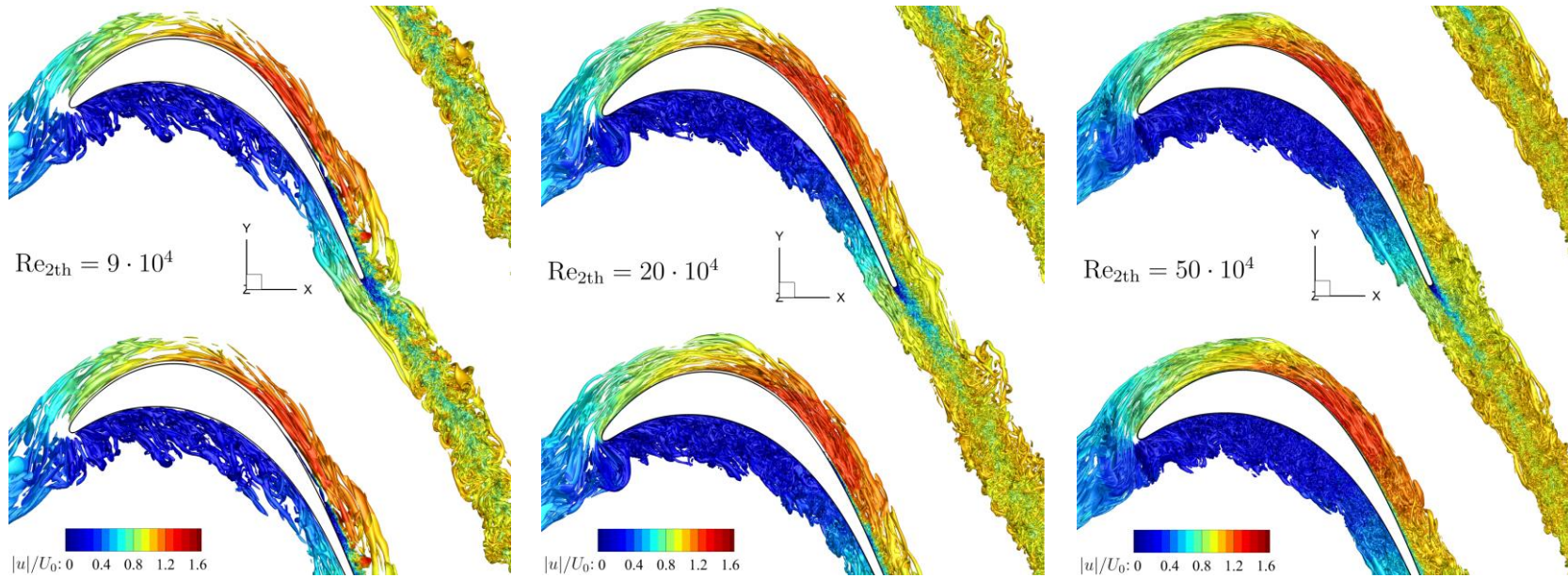


Тестовая задача для настройки источника

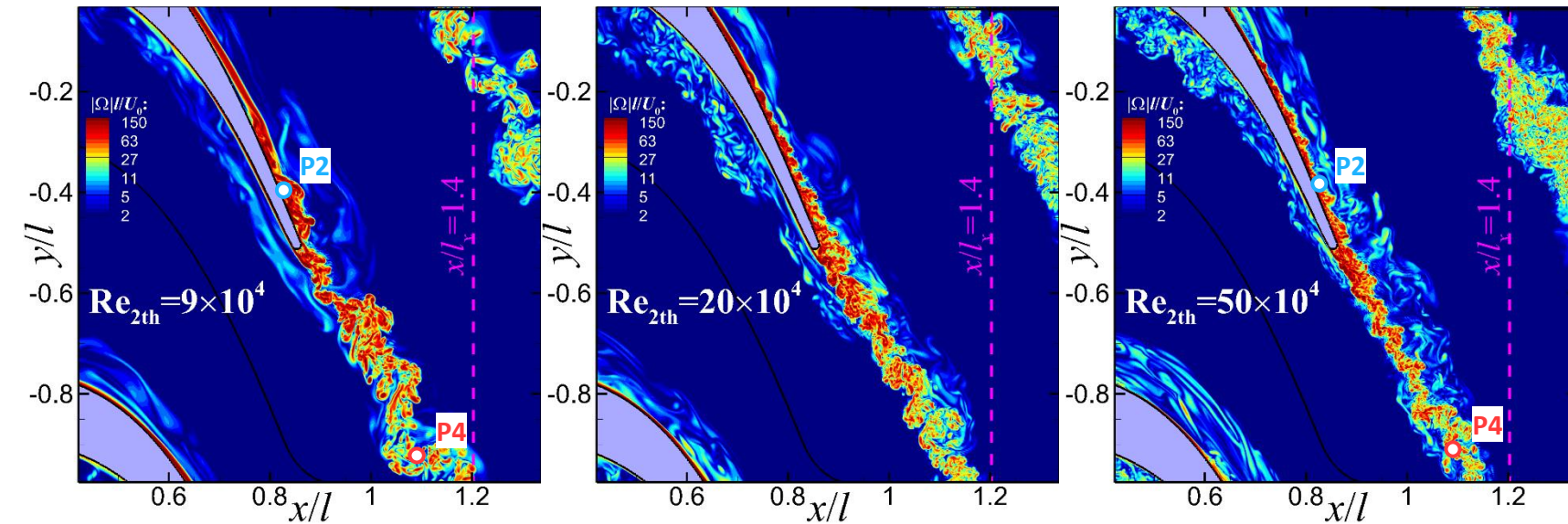
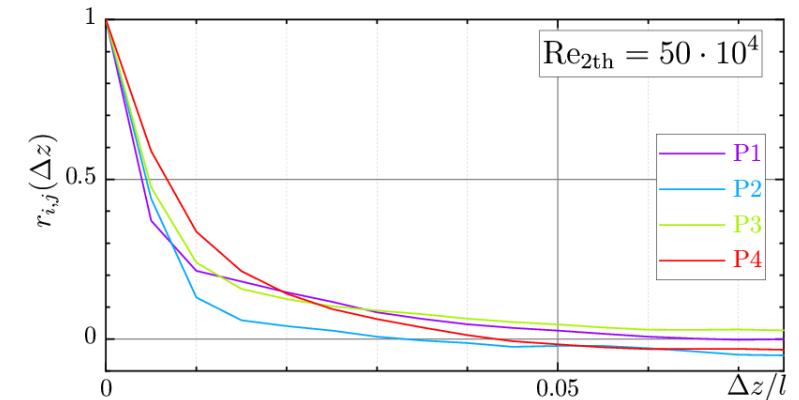
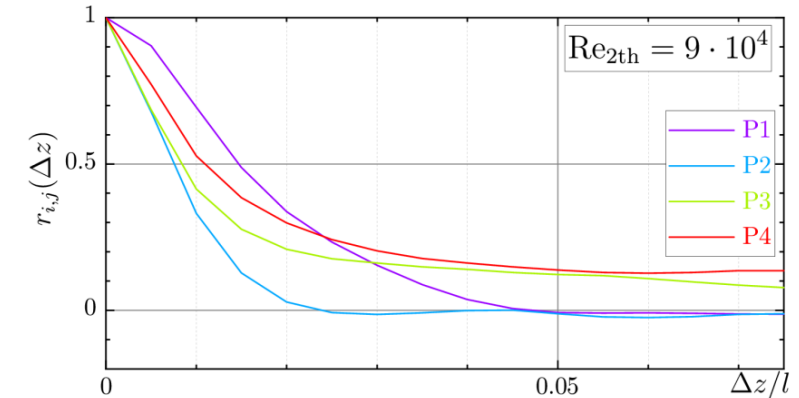
- воспроизводятся условия течения основной задачи
- по Y и Z - периодика



# IDDES: мгновенные картины течения



- увеличение  $Re$  ведет к уменьшению масштабов характерных турбулентных структур
- ЛТ переход на стороне разрежения для всех  $Re$
- крупномасштабные вихри в слое смешения для  $Re_{2th} = 9 \cdot 10^4$

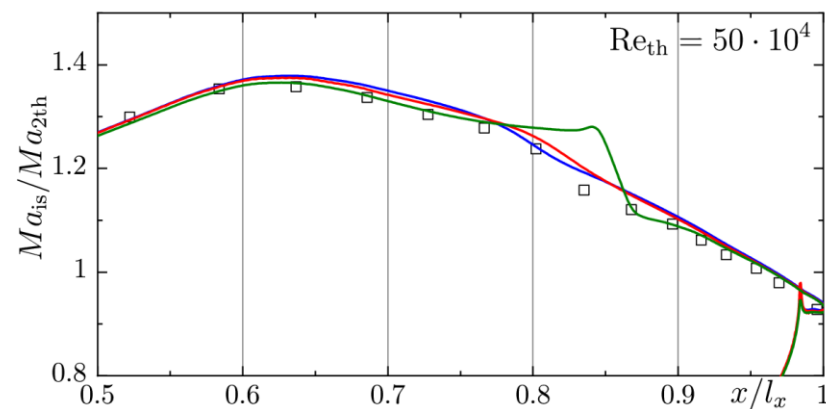
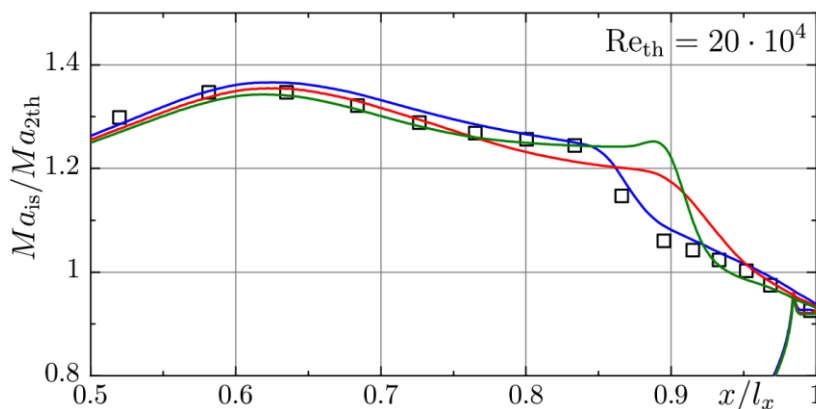
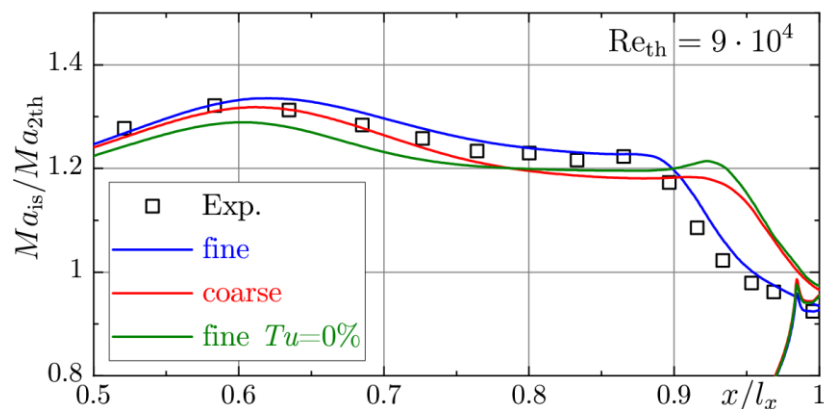
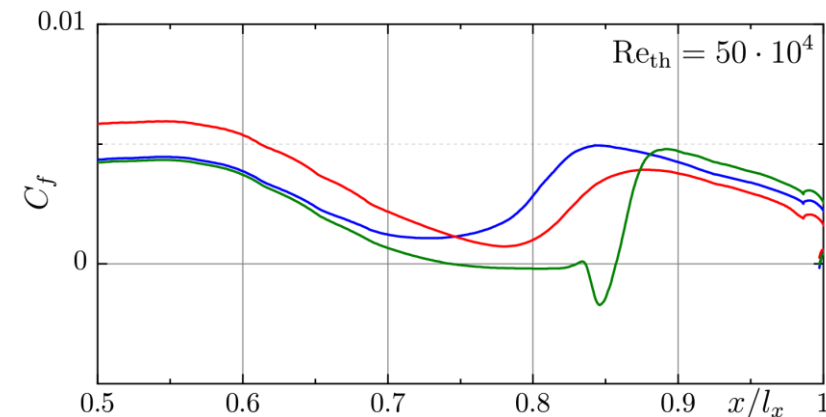
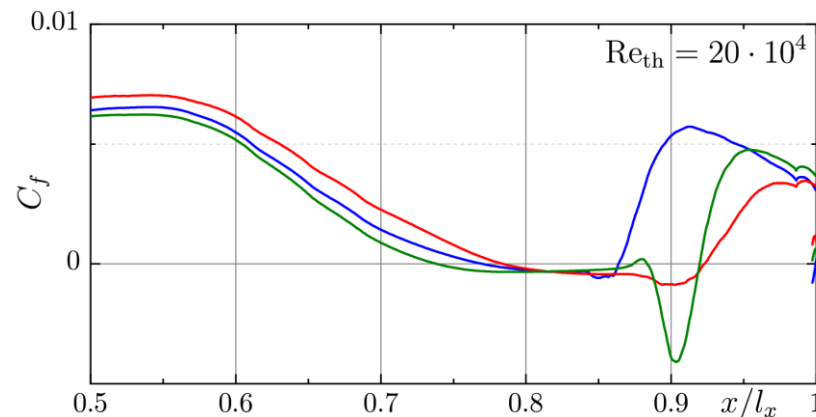
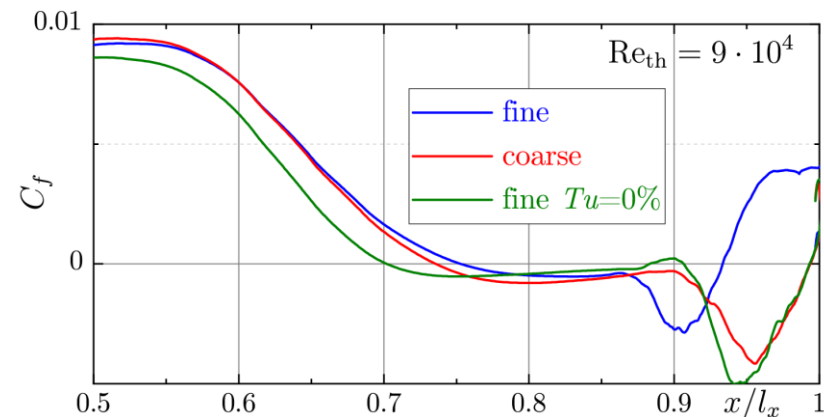


# IDDES: распределения на поверхности лопатки

$Re_{2th} = 9 \cdot 10^4$

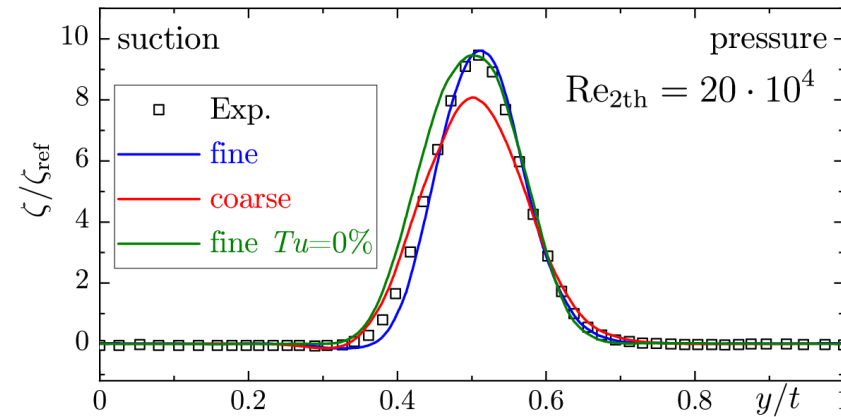
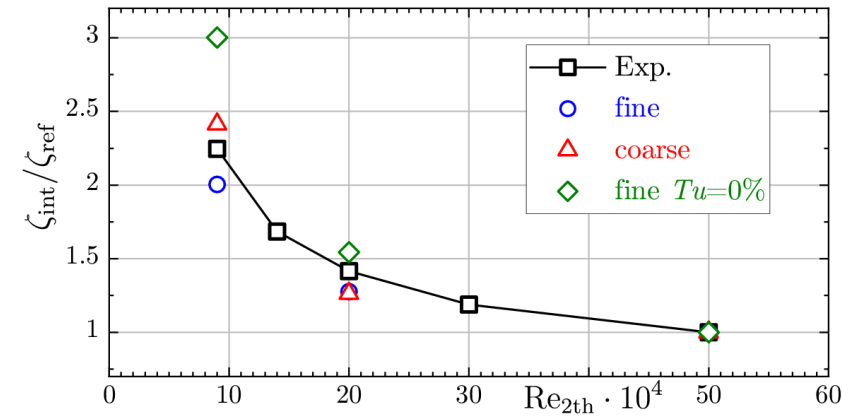
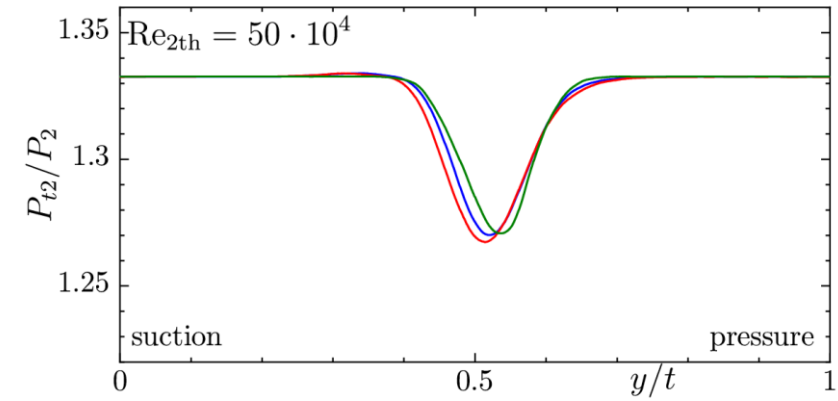
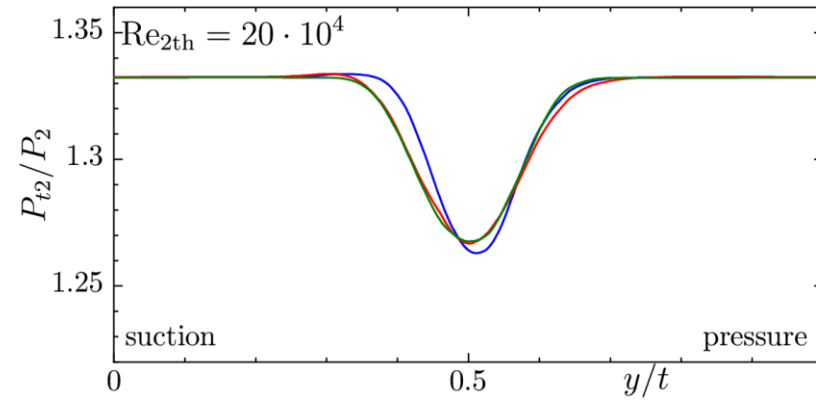
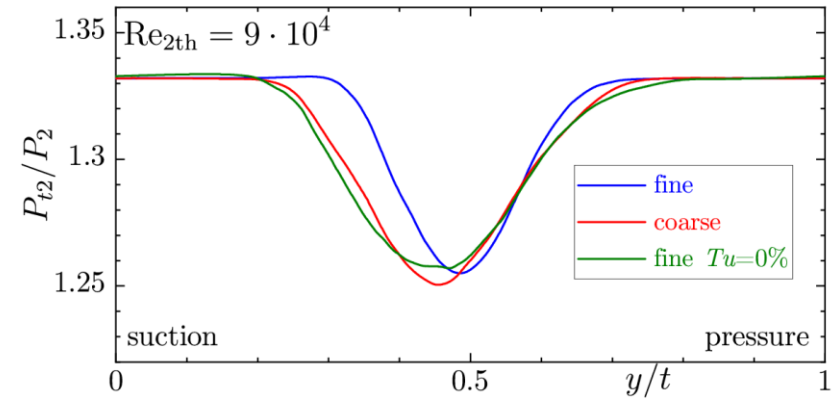
$Re_{2th} = 20 \cdot 10^4$

$Re_{2th} = 50 \cdot 10^4$



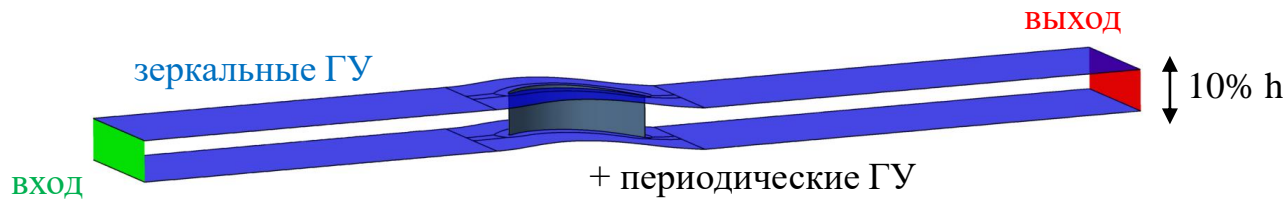
- при  $Re_{2th} = 50 \cdot 10^4$  ЛТ переход – без отрыва
- уменьшение  $Re$  ведет к увеличению разницы между *coarse* и *fine*
- при  $Tu=0\%$  более обширный отрыв
- ЛТ переход – критичное место: недоразрешение (*coarse*) или неточное воспроизведение входящего потока ( $Tu=0\%$ ) ведет к сильному рассогласованию с экспериментом

# IDDES: характеристики на выходе



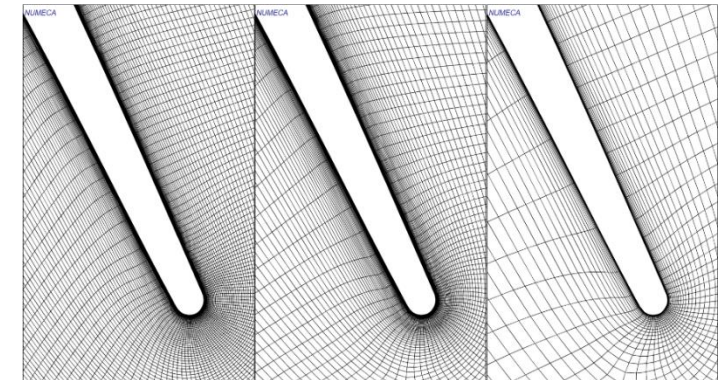
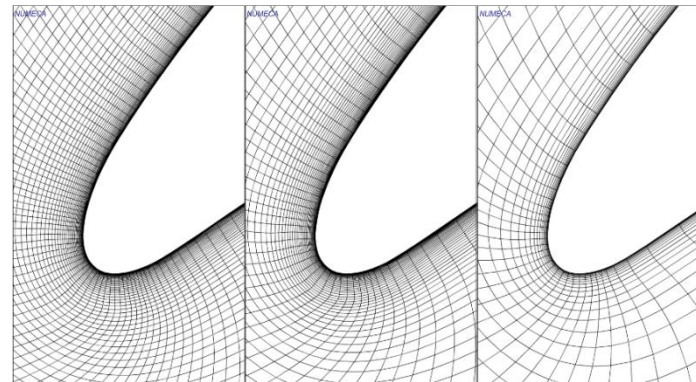
Модель	$Re_{2th}=9 \cdot 10^4$		$Re_{2th}=20 \cdot 10^4$		$Re_{2th}=50 \cdot 10^4$	
	$\zeta, \%$	$\zeta/\zeta_{ref}$	$\zeta, \%$	$\zeta/\zeta_{ref}$	$\zeta, \%$	$\zeta/\zeta_{ref}$
Exp.	—	2.25	—	1.415	—	1
<i>fine</i>	4.37	2	2.78	1.28	2.18	1
<i>coarse</i>	5.26	2.81	2.57	1.37	1.87	1
<i>fine Tu=0%</i>	6.18	3	3.18	1.54	2.06	1

# RANS: постановка задачи



- **Numeca Fine/Turbo v. 14.1**
- Воздух как термически совершенный газ;
- RANS с замыканием SST и BSL-EARSM моделями турбулентности;
- Критерий AGS и  $\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$  модель ЛТП;
- ГУ согласно эксперименту: на входе -  $T_{t1}$ ,  $P_{t1}$ ,  $T_u$ ,  $\Lambda$ ,  $\beta_1$ , на выходе  $P_k$

Параметр	Сетка №1	Сетка №2	Сетка №3
Общее количество узлов, шт	206 тыс.	554 тыс.	1.26 млн
Количество узлов в O-блоке, шт	25	49	57
Мин. угол скошенности	45.1°	45.7°	46.1°
Макс. коэффициент роста	1.9	1.9	1.6
Коэффициент роста в пристеночной области	1.0-1.3	1.0-1.2	1.0-1.2
Макс. соотношение сторон	571	571	571
Кол-во ячеек в плоском слое (без входных и выходных блоков), шт	11 тыс.	37 тыс.	83 тыс.



**Переमेжаемость  $\gamma$**  - доля времени, в течение которого поток является турбулентным. В моделях ЛТП весовой коэффициент, контролирующей генерацию  $k$  ( $k$  и  $\omega$ ) в моделях турбулентности и турбулентности в SA модели.

## Критерий Abu-Ghannam и Shaw (AGS)

- на базе экспериментальных исследований по обтеканию плоской пластины с различными градиентами давления

число  $Re_{\theta t}$ , при котором начинается переход:

$$Re_{\theta t} = 162 + \exp \left[ F(\lambda_{\theta}) - \frac{F(\lambda_{\theta}) * Tu}{6.91} \right]$$

$$\lambda_{\theta} = \left( \frac{\theta^2}{\nu} \right) * \left( \frac{dU_e}{ds} \right)$$

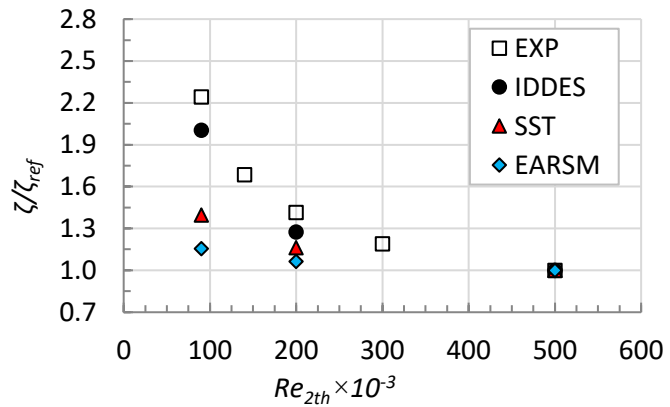
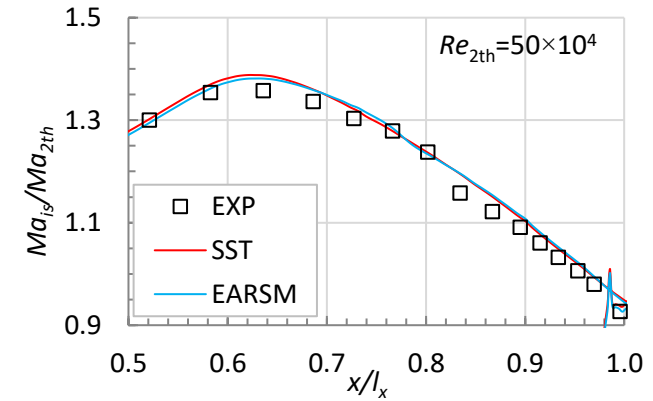
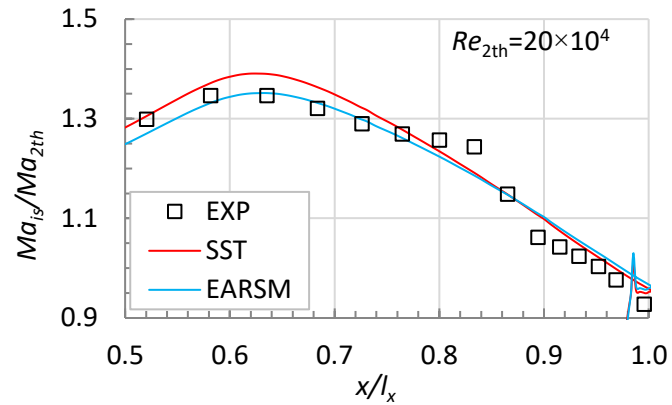
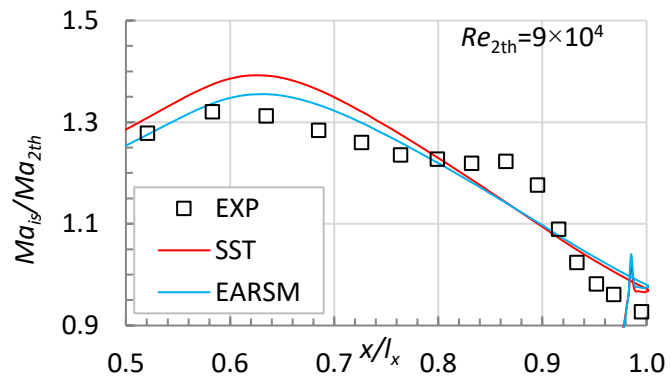
$U_e$  – скорость и  $Tu$  – интенсивность турбулентности на **границе пограничного слоя (нелокальные параметры!)**,  $s$  – расстояние от передней кромки,  $\theta$  – толщина потери импульса в ламинарном слое,  $\nu$  – кинетическая вязкость.

- при достижении  $Re_{\theta}$  критического значения перемежаемость переключается на ненулевое значение
- применяется с SA, SST и k- $\epsilon$  моделями турбулентности
- совместима с NLH

## Модель $\gamma$ - $\widetilde{Re}_{\theta t}$ Langtry и Menter

- диффундирование критерия, аналогичного AGS, внутрь пограничного слоя путем его связи с локальными параметрами через вихревое число Рейнольдса и записи дополнительного уравнения переноса.
- уравнение переноса для перемежаемости
- содержит поправку для описания перехода, вызванного отрывом
- существует множество корреляций для замыкания модели, которые описывают функцию, определяющую длину перехода, и критическое число Рейнольдса, при котором начинается рост перемежаемости.
- применяется с SST и EARSM моделями турбулентности.

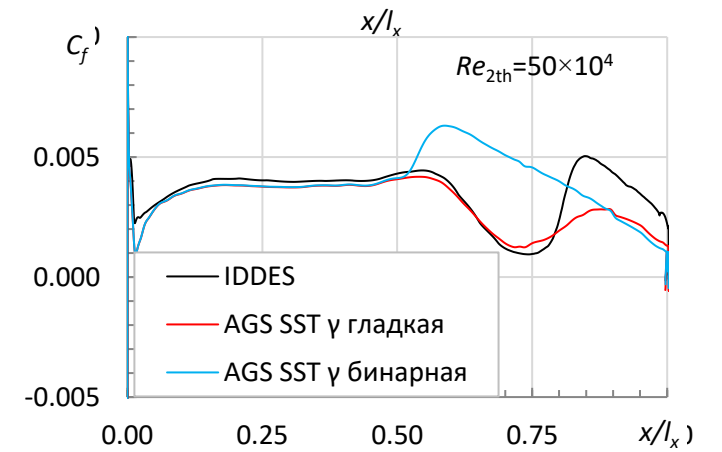
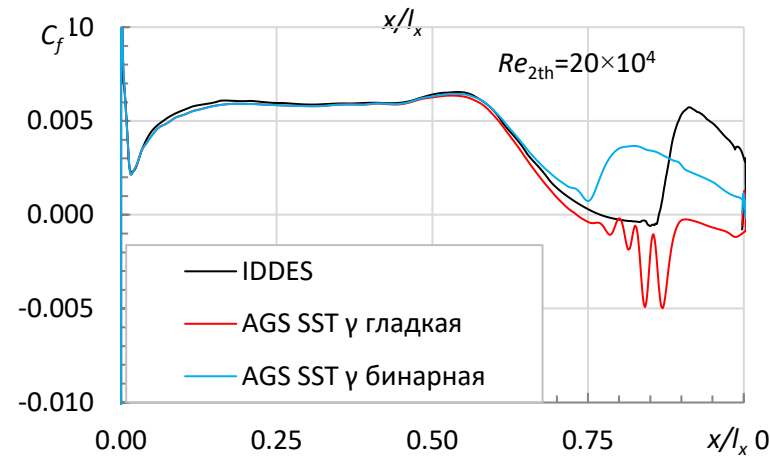
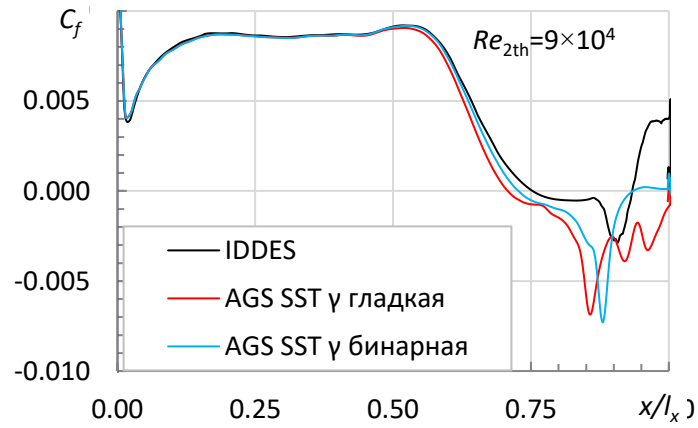
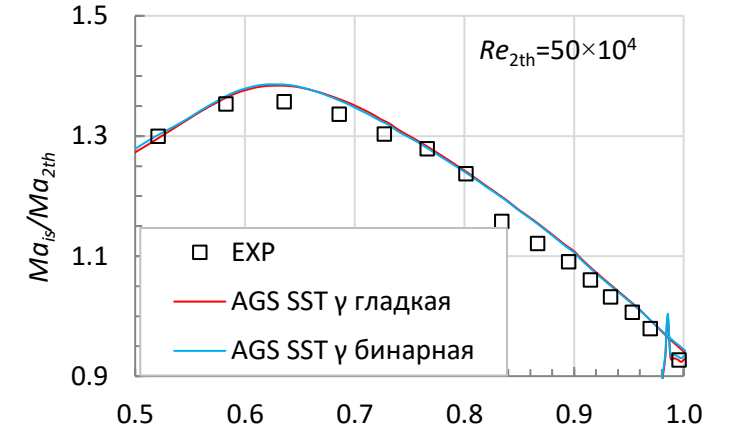
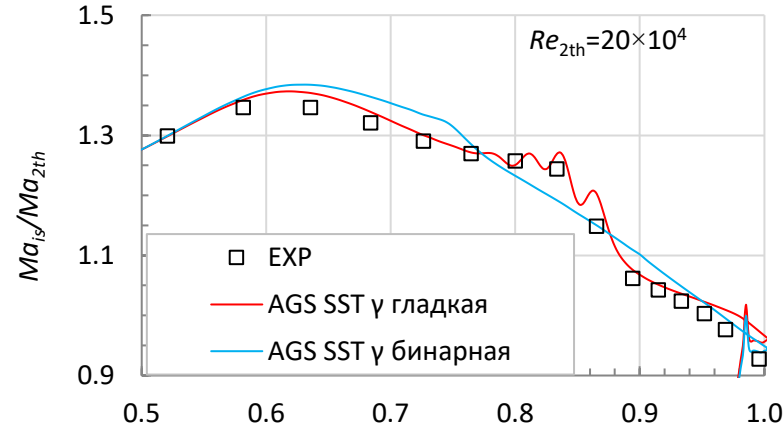
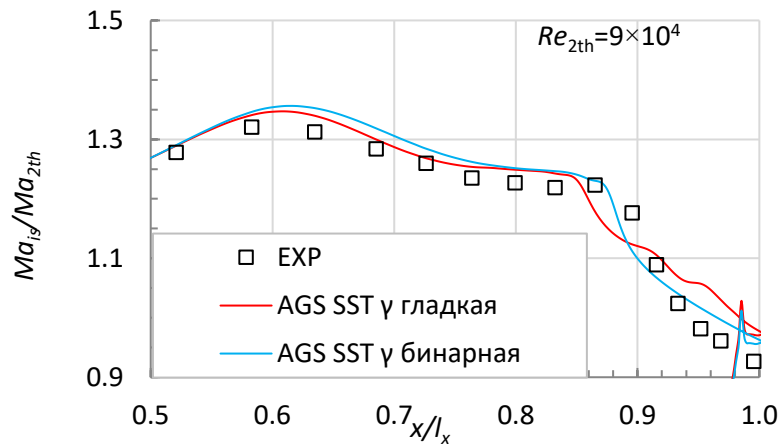
# RANS: результаты без моделей ЛТП



Абсолютные потери полного давления  $\zeta$ , %

Расчет	$Re_{2th}=9 \times 10^4$	$Re_{2th}=20 \times 10^4$	$Re_{2th}=50 \times 10^4$
IDDES	4.37	2.78	2.18
SST	4.18	3.48	2.99
BSL-EARSM	8.58	7.9	7.43

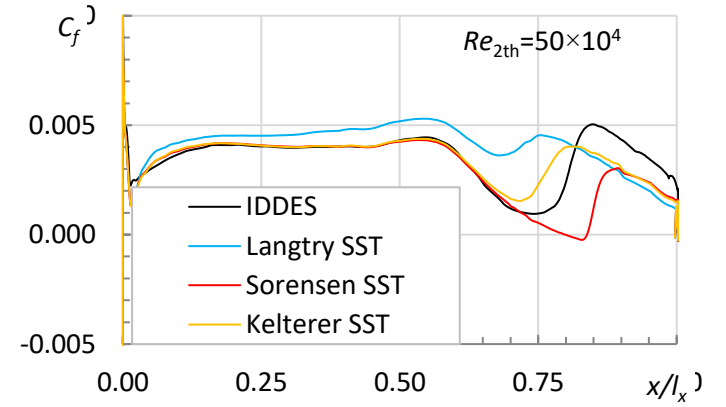
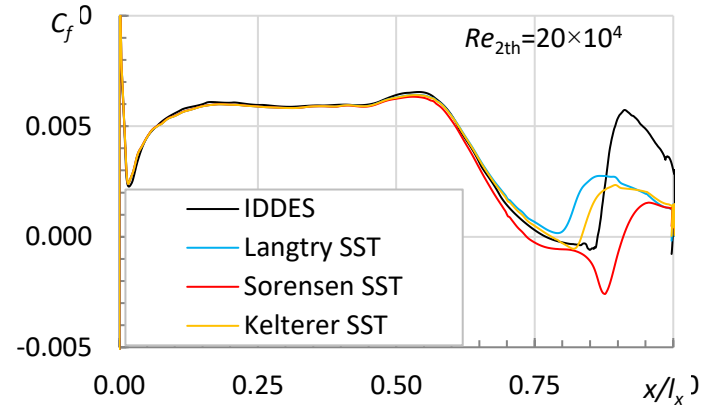
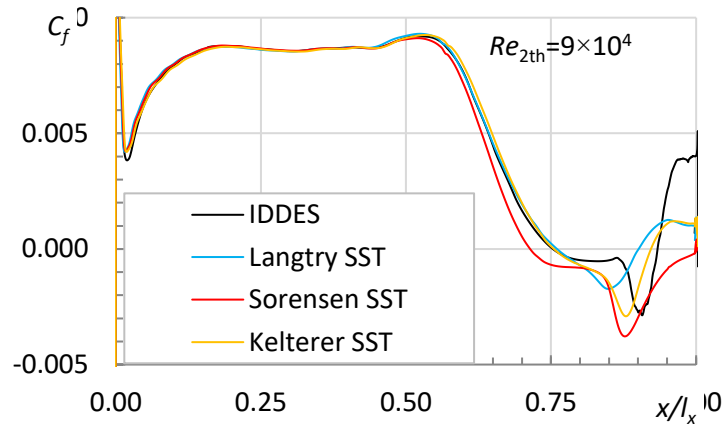
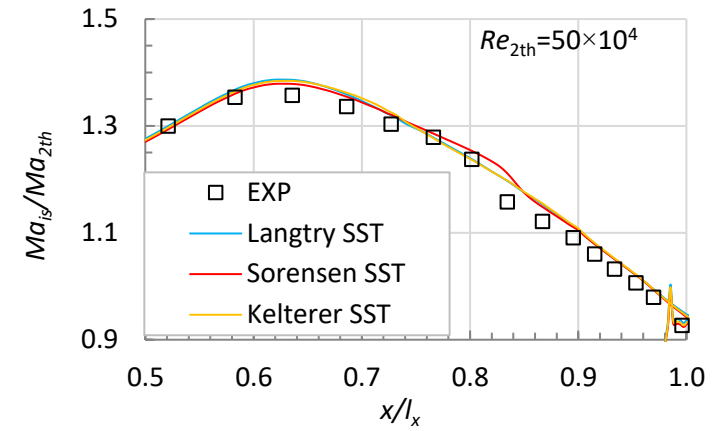
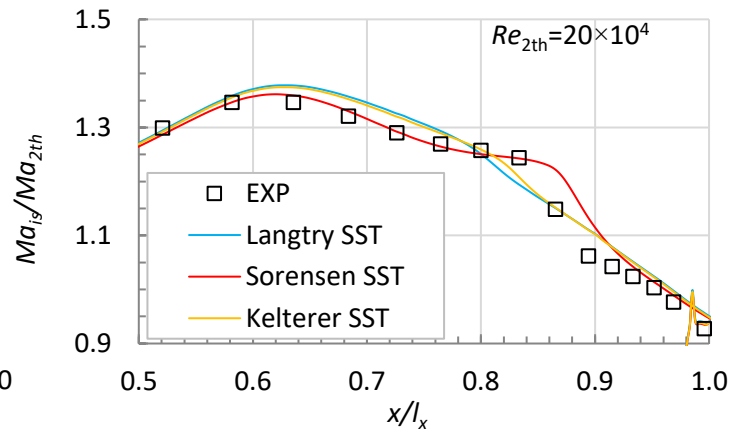
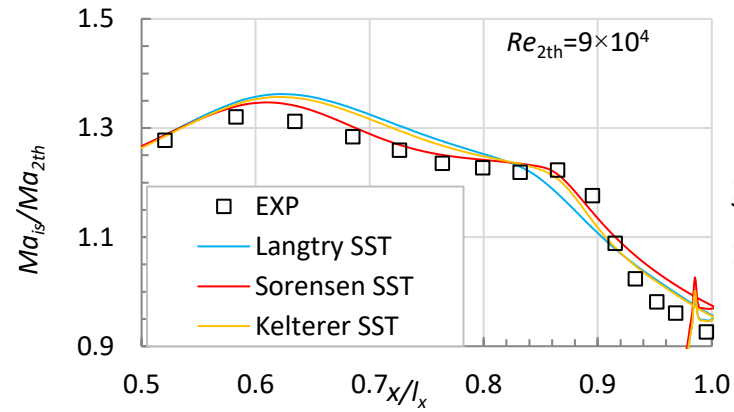
# RANS: результаты AGS SST



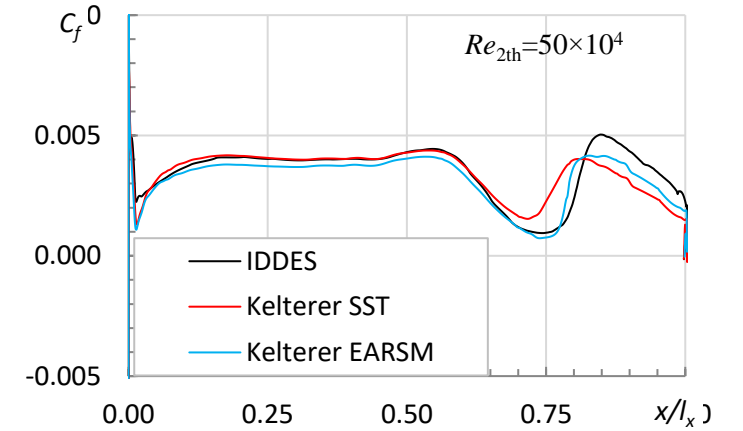
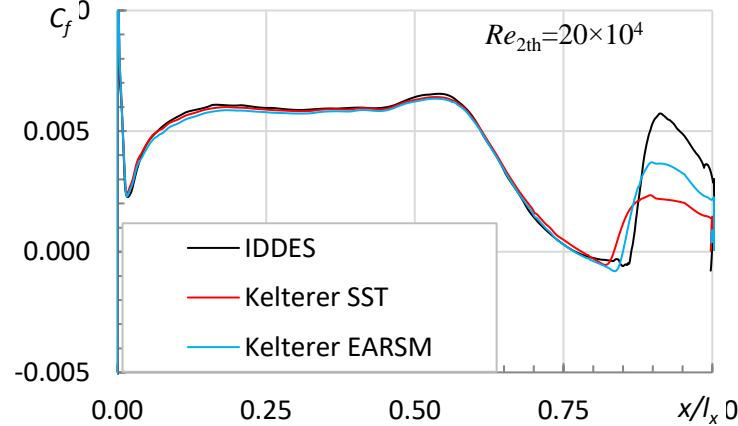
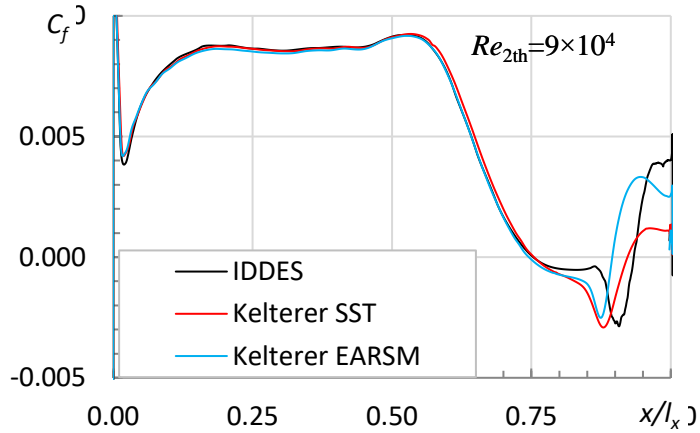
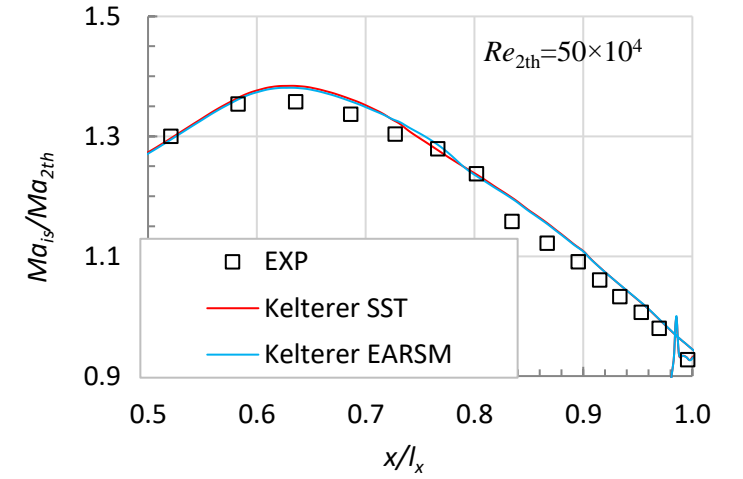
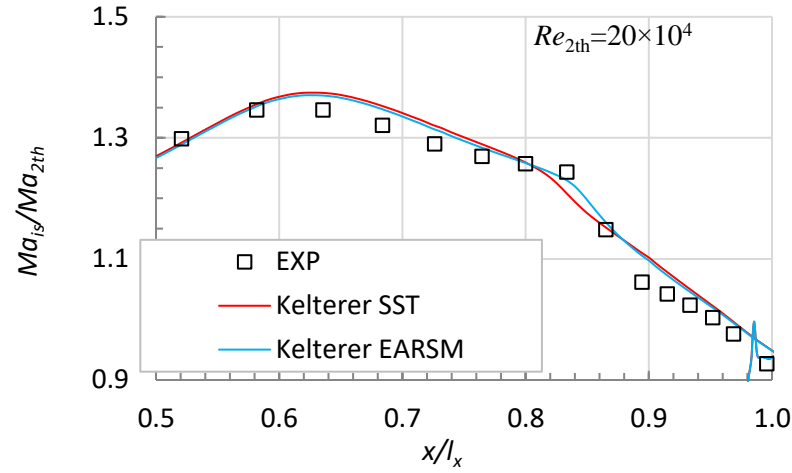
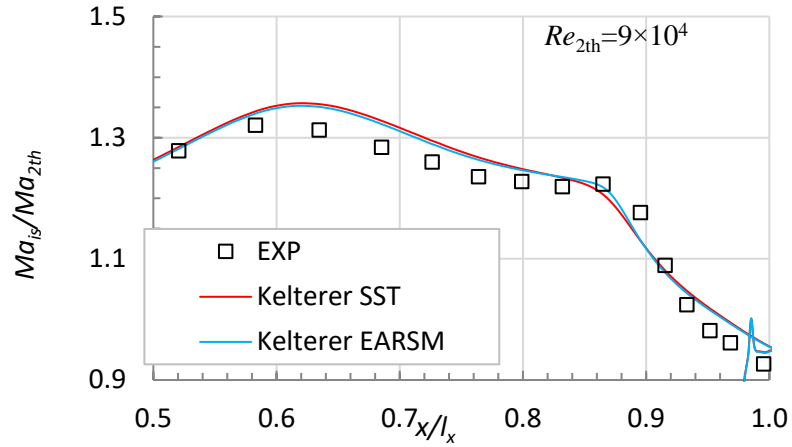
Гладкое распределение – Dhawan и Narisimha



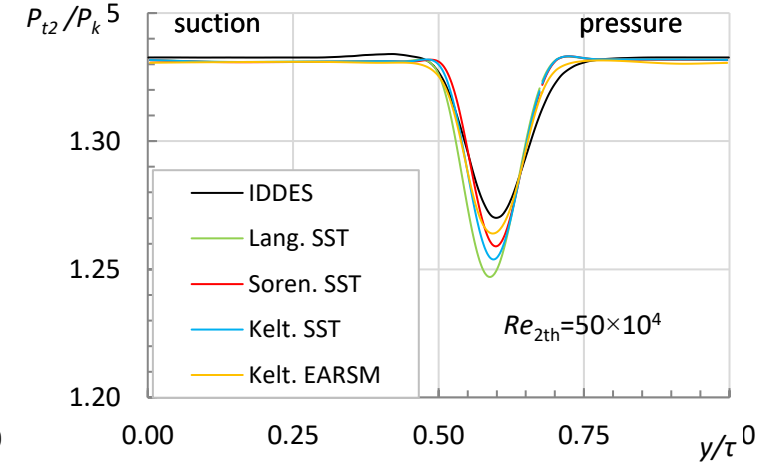
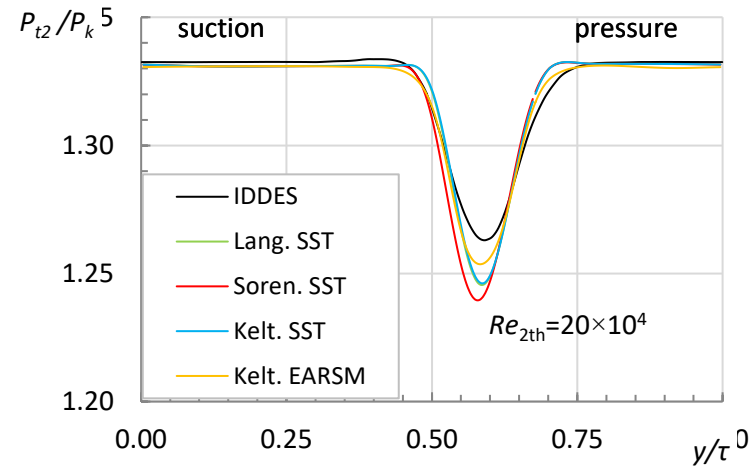
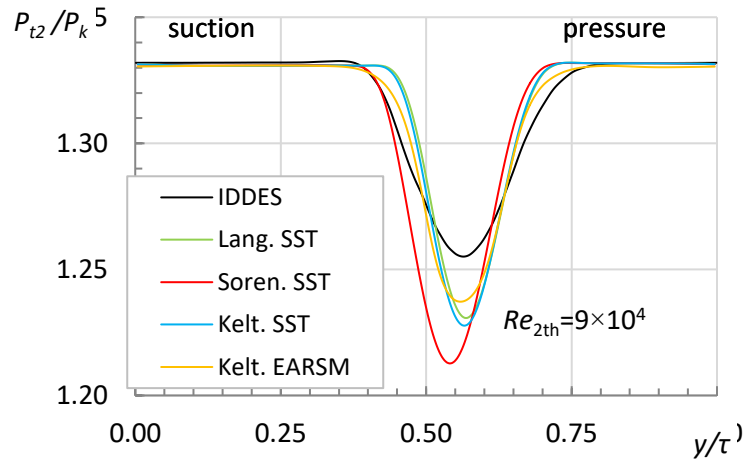
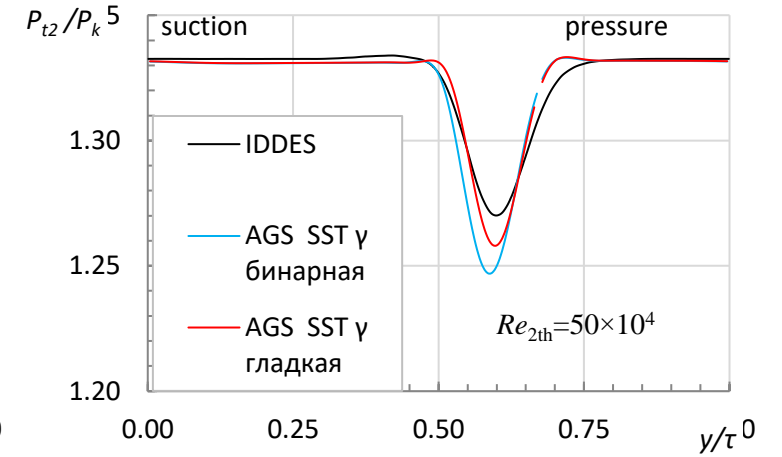
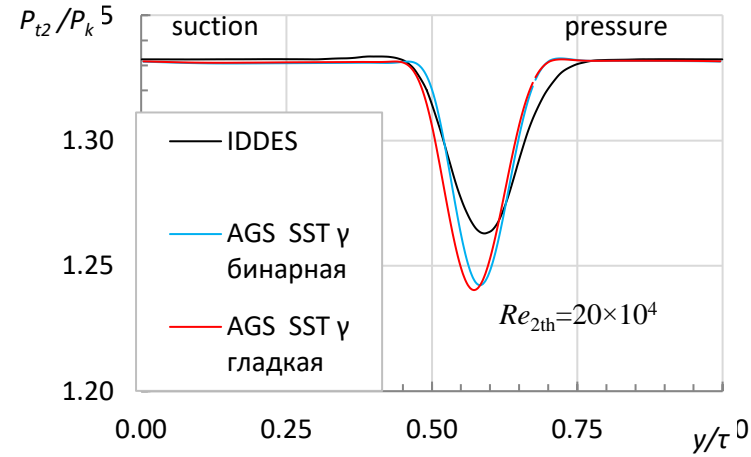
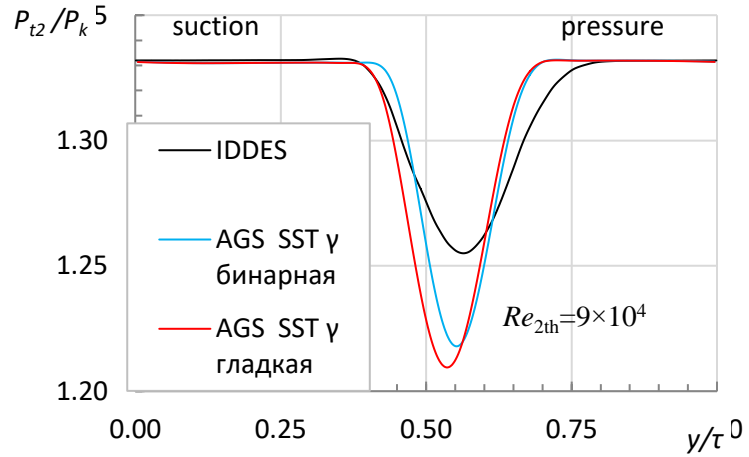
# RANS: результаты $\gamma - \bar{Re}_{\theta t}$ SST



# RANS: результаты $\gamma - \widetilde{Re}_{\theta t}$ SST и EARSM

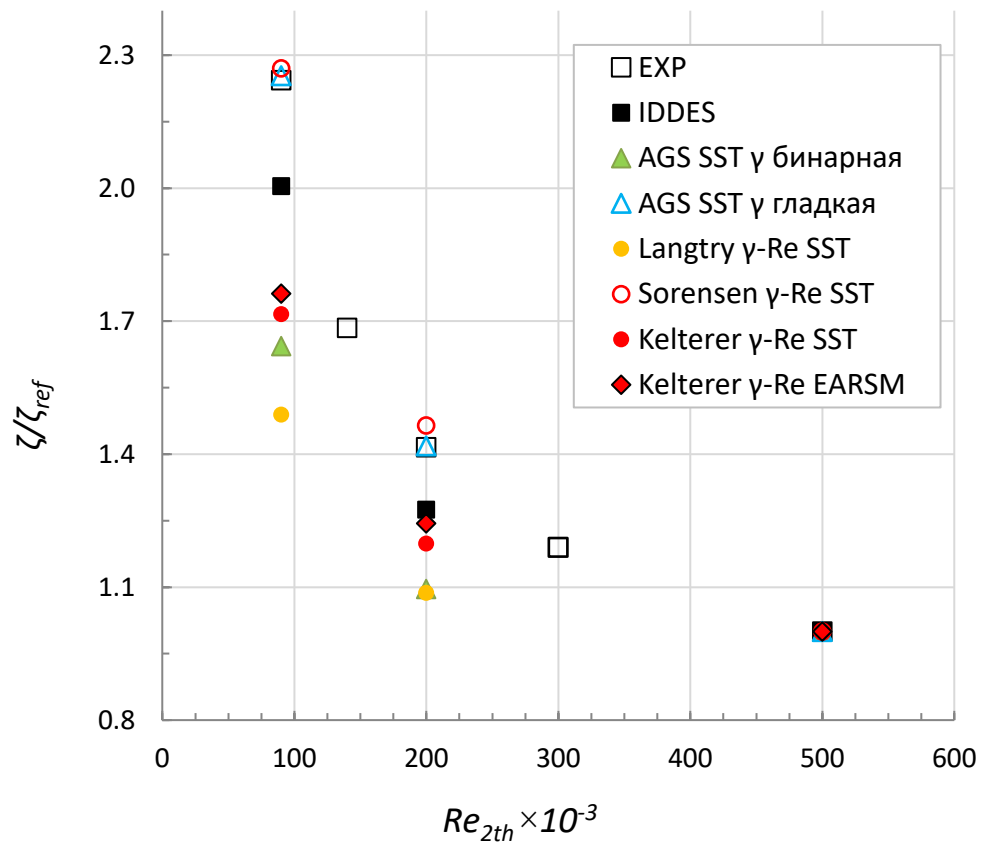


# RANS: характеристики на выходе



# RANS: потери полного давления

Абсолютные потери полного давления  $\zeta$ , %



Расчет	$Re_{2th} = 9 \cdot 10^4$	$Re_{2th} = 20 \cdot 10^4$	$Re_{2th} = 50 \cdot 10^4$
<b>IDDES</b>	<b>4.37</b>	<b>2.78</b>	<b>2.18</b>
SST	4.18	3.48	2.99
BSL-EARSM	8.58	7.9	7.43
AGS SST $\gamma$ бин.	4.4	2.92	2.67
AGS SST $\gamma$ глад.	5.06	3.19	2.25
$\gamma - \bar{Re}_{\theta t}$ SST Langtry	4.04	2.95	2.71
$\gamma - \bar{Re}_{\theta t}$ SST Sorensen	5.13	3.31	2.26
$\gamma - \bar{Re}_{\theta t}$ SST Kelterer	4.19	2.92	2.43
$\gamma - \bar{Re}_{\theta t}$ BSL-EARSM Kelterer	4.59	3.24	2.6

# Вычислительная стоимость расчетов

## IDDES

83.2 млн. узлов,  $11l/U_0$

- 80MPI x 12OpenMP x HT (960 CPUs): ~**30.5 ч**  
Intel Xeon E5-2680v3 (12 CPU+HT)  
29260 CPUh
- 3 узла по 4 = 12 GPU NVIDIA V100 32GB  
~**28.5 часа**

## RANS

1.26 млн узлов

~ **40-50 мин** в зависимости от ЛТП модели  
на 4 ядрах Intel(R) Xeon (R) CPU E5-2690v3

# Заключение

- Сформирована эталонная постановка для вихреразрешающего моделирования течения в высоконагруженной турбинной решетке при низких числах Рейнольдса
  - определено необходимое сеточное разрешение
  - показана важность учета входной турбулентности
  - получено хорошее согласование с экспериментальными данными
- Сформирована постановка в рамках RANS для моделирования течения в решетке T106C при низких числах Рейнольдса
  - определено необходимое сеточное разрешение
  - исследованы различные способы моделирования ЛТП: критерий AGS и модель  $\gamma - \bar{Re}_{\theta t}$
  - показана сильная чувствительность результатов к настройкам моделей ЛТП и выбору модели турбулентности
  - по результатам валидации победила выбрана модель  $\gamma - \bar{Re}_{\theta t}$  BSL-EARSM с подключением корреляций Kelterer
- Несмотря на более высокую точность моделирования, применение вихреразрешающих методов для анализа течения 3D лопаток на данный момент не представляется возможным
- Использование эмпирической RANS модели для реальной геометрии требует предварительной тщательной калибровки