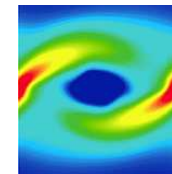




CFD-weekend 2015



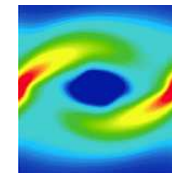
Комплекс программ σFlow. 2015

Гаврилов А.А.,
Дектерёв А.А., Сентябов А.В.

Институт Теплофизики СО РАН



Специализированные комплексы программ



σFlow CFD code

SigmaFlame

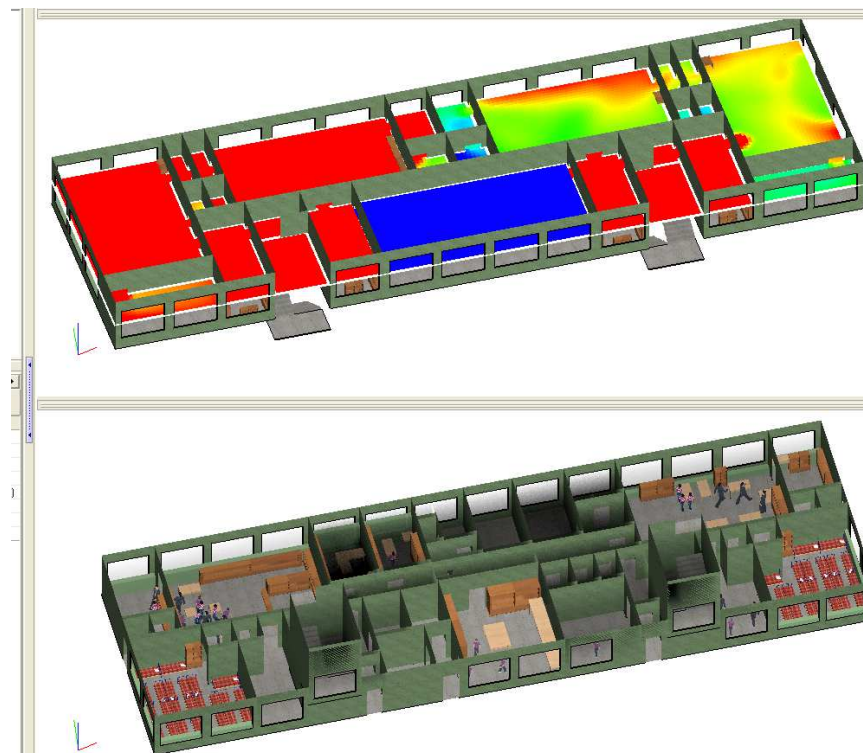
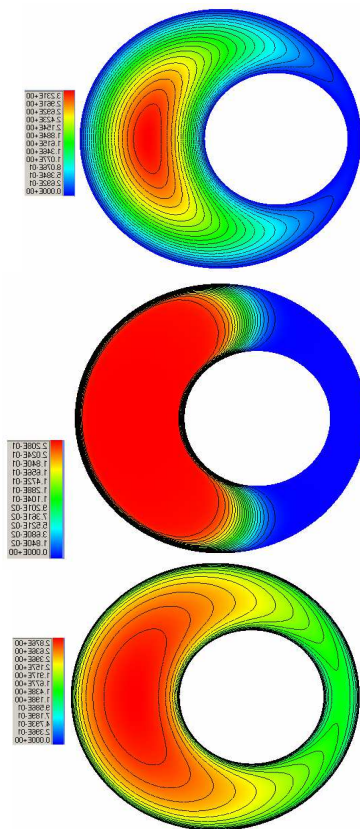
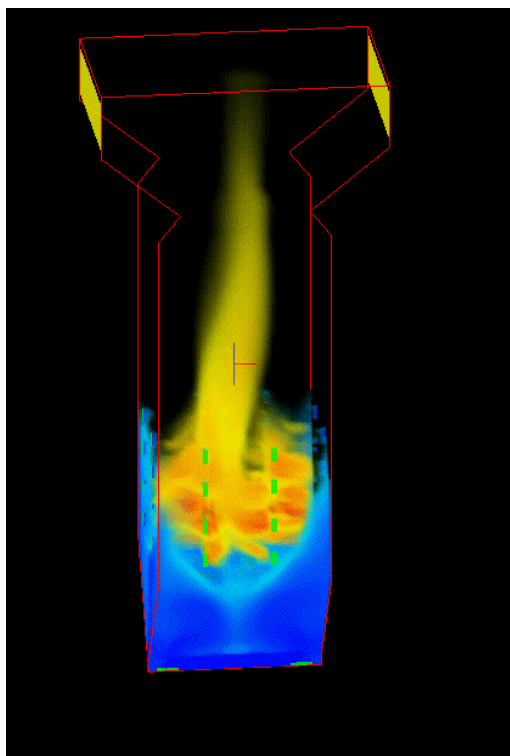
Пылеугольные котлы

TubeFlow

Течение в
кольцевом канале

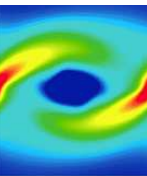
SigmaFire

Моделирование пожаров





Численный метод. Несжимаемые течения



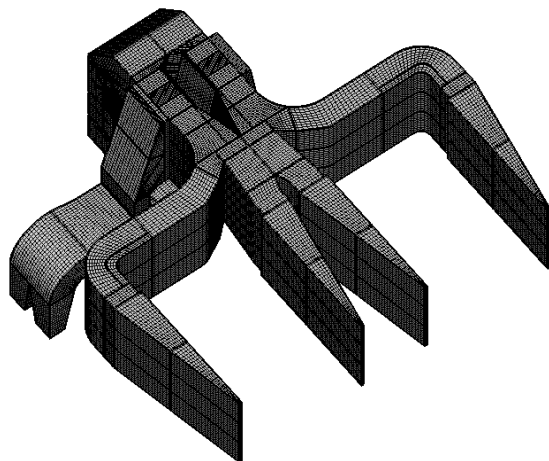
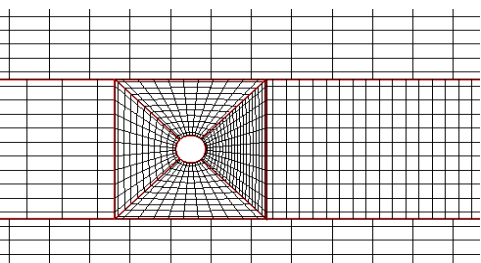
- **Метод контрольного объема** для неструктурированной сетки;
- **SIMPLE** подобный метод для связи полей давления и скорости; совмещенные сетки с монотонизацией **P_{хи}–Чоу**;
- Нестационарные слагаемые – неявный трёхслойный метод, метод Кранка–Николсона
- Аппроксимация конвективных потоков – **CDS, High-order CDS, QUICK**, family of **TVD** schemes ...;
- Решение системы алгебраических уравнений:
стабилизированный метод бисопряжённых градиентов (**BiCGStab**),
алгебраический многосеточный метод (**amgcl**, Демидов Д.)
- **Распараллеливание** – разбиение на подобласти (MeTiS), MPI
расчет на GPU



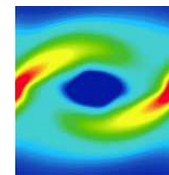
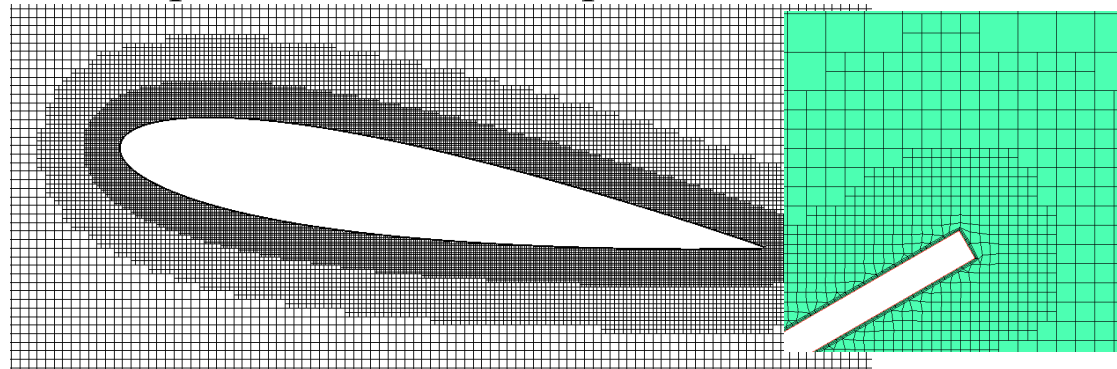
Сетки

Собственные генераторы сеток

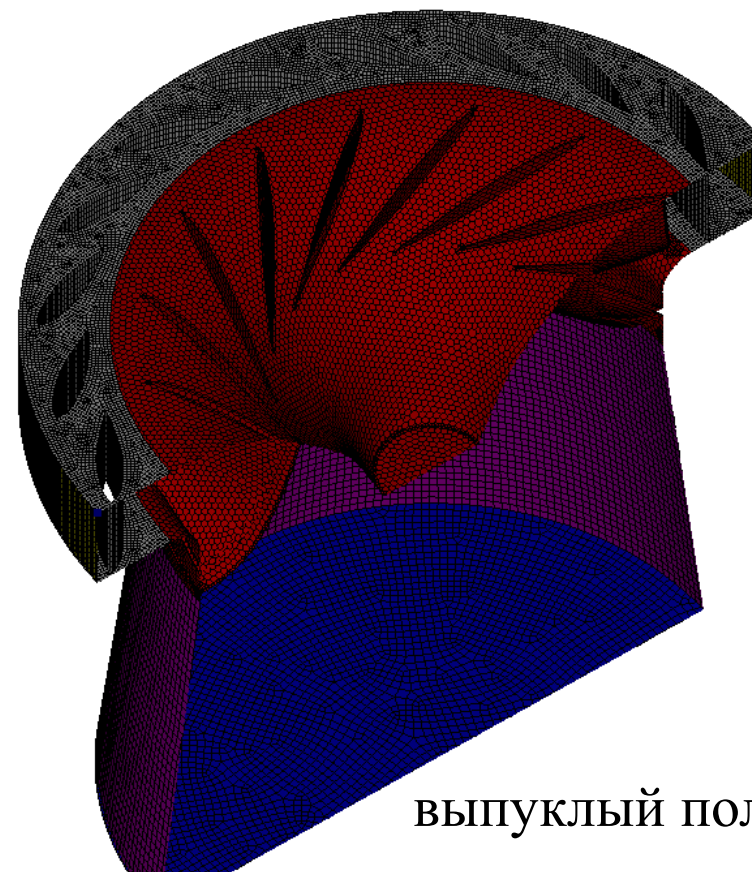
1. Многоблочная структурированная сетка



2. Гибридная сетка (квадратный элемент)

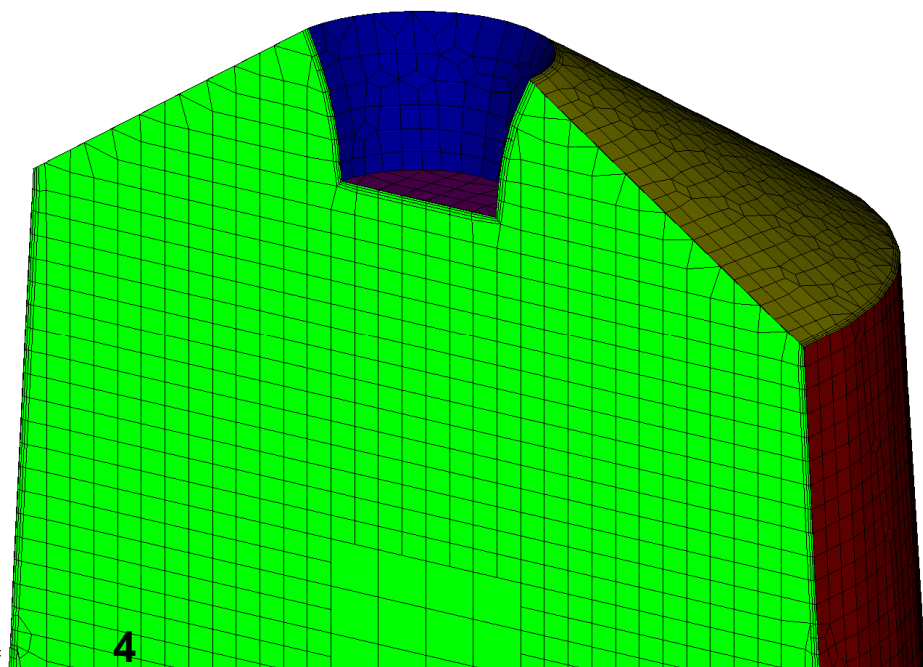


Импорт (Fluent) и объединение сеток



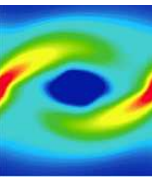
выпуклый полиэдр

3. Гибридная сетка (кубический элемент)





GPGPU-версия



Модели:

- ламинарное стационарное течение
- ламинарное нестационарное течение
- LES: WALE

Реализация:

- CUDA 7.0
- MPI (GPU/GPU, CPU/CPU, CPU/GPU)

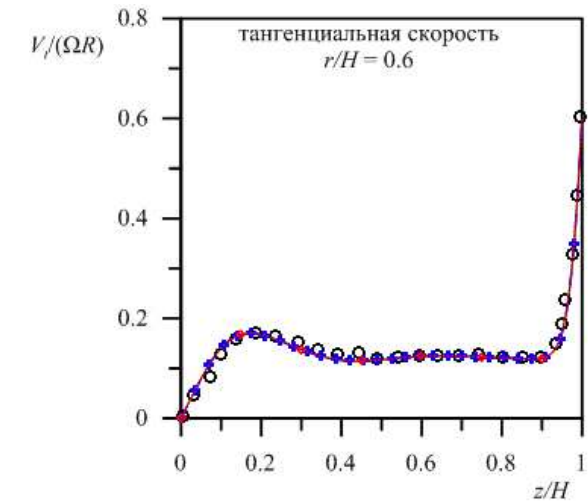
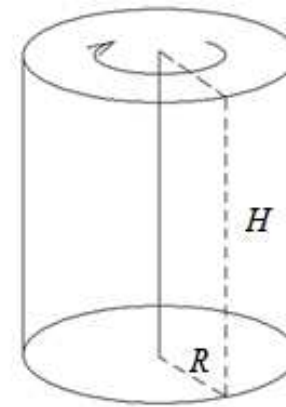
Решение СЛАУ:

- вариационный метод сопряженных невязок
- **amgcl (в работе)**

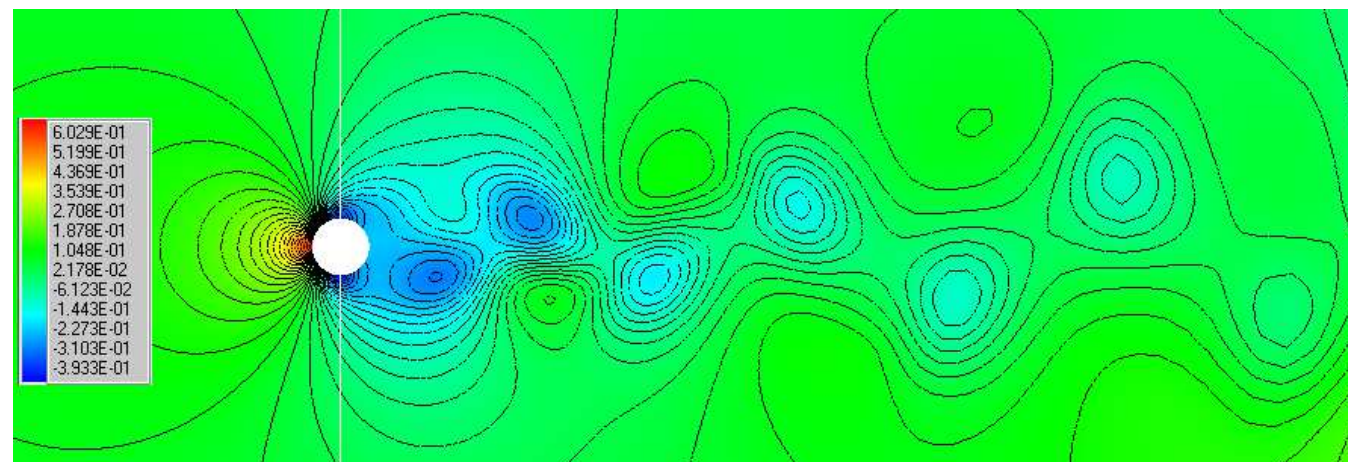
Сетка:

- неструктурированная из гексаэдральных ячеек

Течение в «банке»



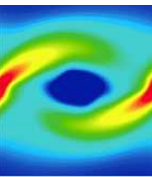
Дорожка Кармана при обтекании цилиндра



МГНОВЕННОЕ ПОЛЕ ДАВЛЕНИЯ

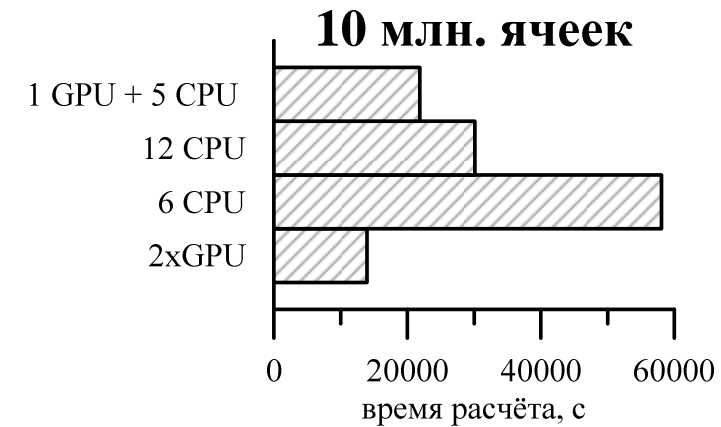
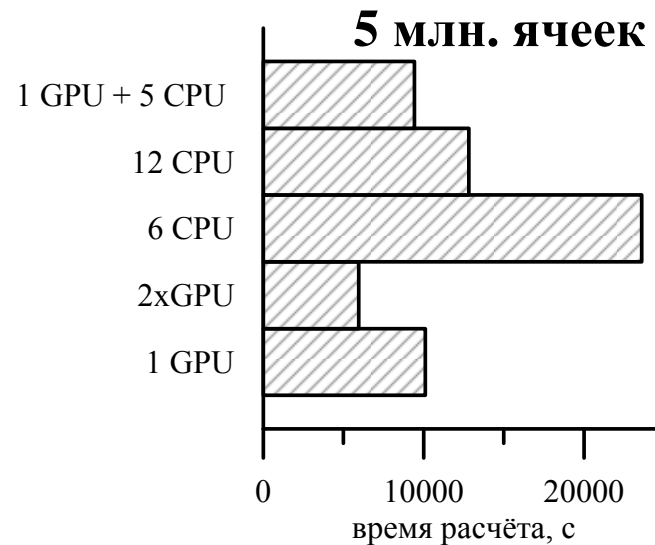
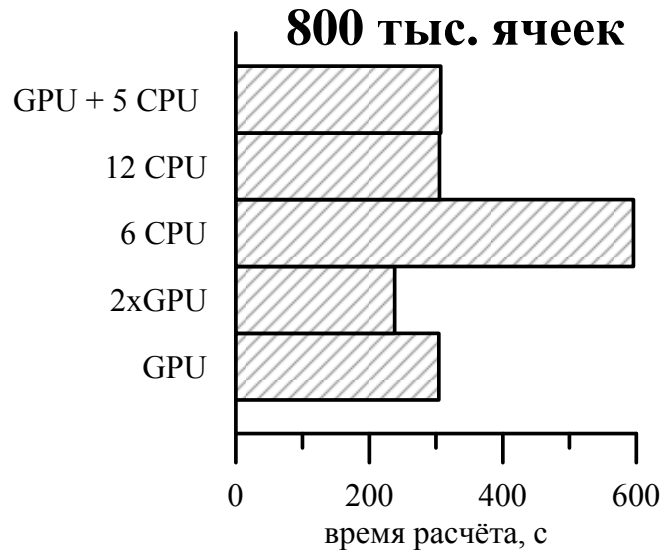


GPGPU тестовые расчёты

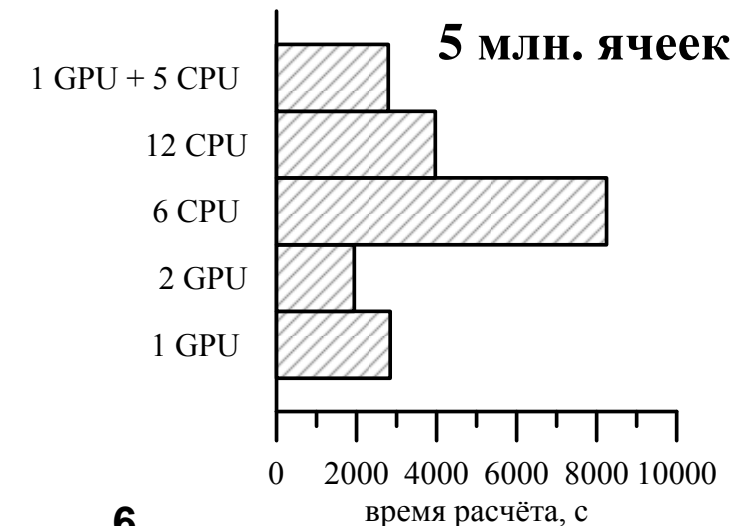


Течение в «банке»:

GPU: Titan Black
CPU: Core i7-5820k, 3.3 ГГц, 6 ядер



Обтекание цилиндра:

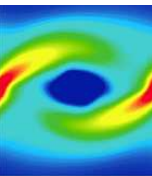


Таким образом:

- GPU в 2 – 3 раза производительнее 1 процессора (6 ядер)
- Масштабирование на несколько GPU позволяет проводить моделирование с использованием сеток (>8 млн. ячеек)



Моделирование турбулентных течений



RANS модели турбулентности

1. **k- ω SST** model (Menter, 1993)
2. Elliptic relaxation eddy viscosity model **k- ϵ - ζ -f** (Hanjalić et al., 2004):
3. Differential Reynolds stress model (Speziale, Sarkar and Gatski, **SSG**), simplified analytical wall function (SAWF)
4. Elliptic blending second-moment closure (**EBM**) (Manceau and Hanjalic, 2002), integration up to the wall (WIN), blended wall treatment
5. **Non-linear Eddy-Viscosity Models (NLEVM)**

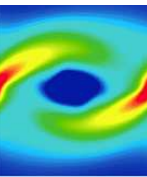
LES модели

1. **Dynamic LES** (Lilly, 1992)
2. **WALE** (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity, Nicoud and Ducros, 1999)

Hybrid RANS/LES approach

1. ζ -f /Dynamic LES (Hadžiabdić 2006, Hanjalić 2005, Delibra et al. 2010a)
2. RANS ζ -f /SGS turbulent kinetic energy transport equation
3. **Partially Averaged Navier–Stokes (PANS)** (Basara et al, 2011)

Elliptic blending second-moment closure



In complex flows it is difficult to make a mesh that will satisfy the criteria for **WF** ($y^+ > 30$) or **WIN** ($y^+ < 1$) everywhere.

Elliptic blending SMC (EBM)

(Manceau and Hanjalic, 2002)

LowRe SMC model based blending of near-wall and far-from-the-wall forms

$$\phi_{ij} = (1 - \alpha^2) \phi_{ij}^w + \alpha^2 \phi_{ij}^h$$

$$\nabla^2 \alpha + \frac{1}{L^2} (1 - \alpha) = 0$$

$$c_\eta = 80 \quad C_L = 0.161$$

$$L = C_L \max \left[\frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, c_\eta \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \right]$$



Blended wall treatment (BWT)

(Popovac and Hanjalic, 2005)

A unified blending strategy for all variables

$$\varphi^+ = \varphi_v^+ e^{-\Gamma} + \varphi_t^+ e^{-1/\Gamma} \quad \Gamma = \frac{a(y^+)^4}{1 + by^+}$$

For channel flow



$$\alpha(y^+) \approx 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A^+}\right)$$

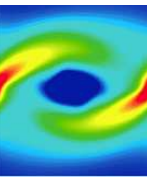
van Driest damping function

$$\frac{\partial}{\partial y} \overline{u_i u_k} = 0$$

$$\alpha_w = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A^+}\right)$$



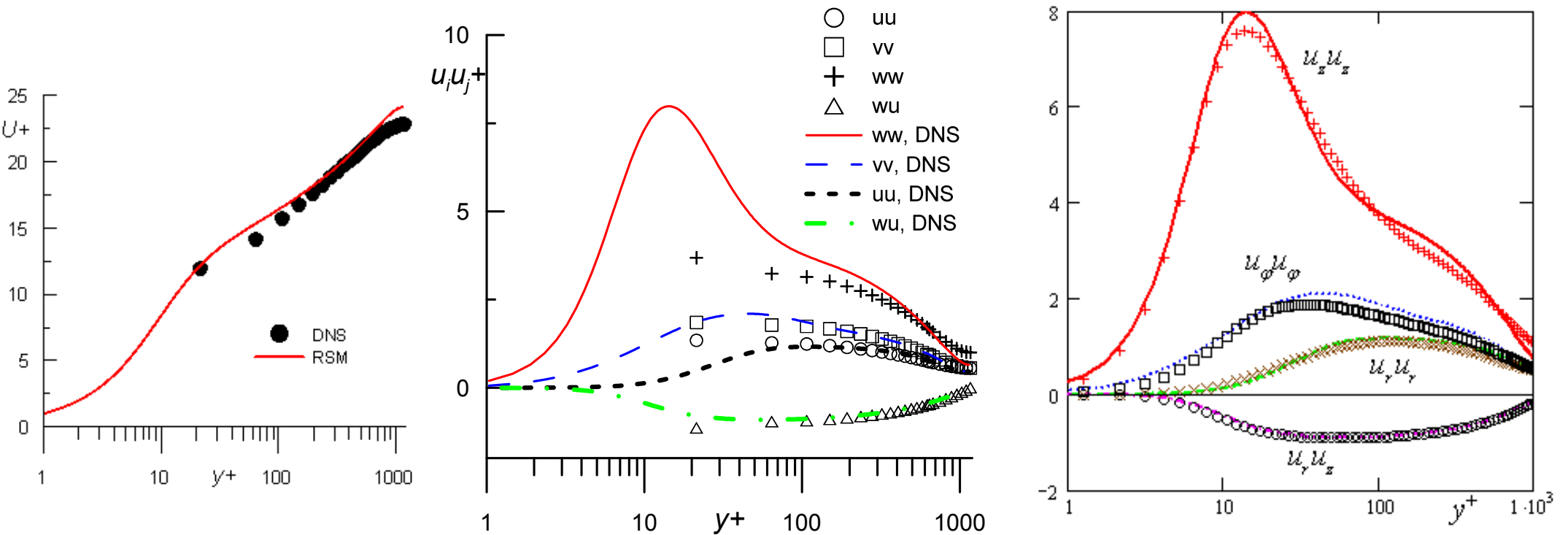
Pipe flows



Pipe flows for $Re_\tau=1142$ (DNS by Wu and Moin, 2008)

y^+ at first cell ~ 20 (WF)

y^+ at first cell < 1 (WIN)

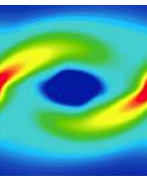


Mean velocity and turbulent stress components. Lines – DNS, symbols – EBM

Xiaohua Wu and Parviz Moin "A direct numerical simulation study on the mean velocity characteristics in turbulent pipe flow", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 608 pp. 81-112, 2008



Hybrid LES/RANS model



The **hybrid model** is a **zonal LES/RANS** scheme coupling k - ε - ζ - f RANS model (Hanjalić et al. 2004) with LES based on SGS turbulent kinetic energy transport equation (Yoshizawa and Horiuti, 1985).

Pre-defined RANS/LES interface location

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P - \rho \varepsilon_{HYB} \quad y^+ \sim 1500 - 2000 \quad P = \mu_t 2 S_{ij} S_{ij}$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{L_t < 10 \Delta}{L_t \geq 10 \Delta} \left(\begin{matrix} 0, \\ 1, \end{matrix} \right) \begin{matrix} \text{RANS} \\ \text{LES} \end{matrix}$$

$$\frac{\partial \rho \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \zeta) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\zeta} \right) \nabla \zeta \right] + \rho f_{HYB} - \frac{P}{k} \zeta$$

Simplified Analytical Wall Functions (Popovac and Hanjalić, 2007)

$$L_{HYB}^2 \nabla^2 f - f = \frac{1}{T_{HYB}} \left(\frac{2}{3} - \zeta \right) \left(C_{1f} - 1 + C_{2f} \frac{P}{\rho \varepsilon_{HYB} y^+} \right) \quad 100 - 300$$

$L_t \sim 10 \Delta$

A weighted sum of LES and RANS model $\varphi_{HYB} = \varphi_{RANS} (1 - F) + \varphi_{LES}$

In the RANS mode:

$$L = C_L \max \left[\min \left(\frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, \frac{k^{1/2}}{C_\mu \sqrt{6} \sqrt{S_{ij} S_{ij}} \zeta} \right), c_\eta \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \right] \quad \mu_{t,RANS} = \rho C_\mu k \zeta T$$

$$T = \max \left[\min \left(\frac{k}{\varepsilon}, \frac{0.6}{C_\mu \sqrt{6} \sqrt{S_{ij} S_{ij}} \zeta} \right), c_T \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \right] \quad \varepsilon_{RANS} = \varepsilon$$

In the LES mode:

$$L_{LES} = C \Delta \quad \mu_{t,LES} = \rho (c_k k^{1/2} \Delta) \quad c_k = 0.07$$

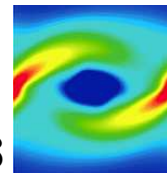
$$T_{LES} = \frac{L_{LES}}{k^{1/2}} \quad \varepsilon_{LES} = \frac{k^{3/2}}{L_{LES}} \quad C = 0.8$$

$$f_{LES} = \min \left(f, \frac{P}{\rho k} \zeta_{iso} \right)$$

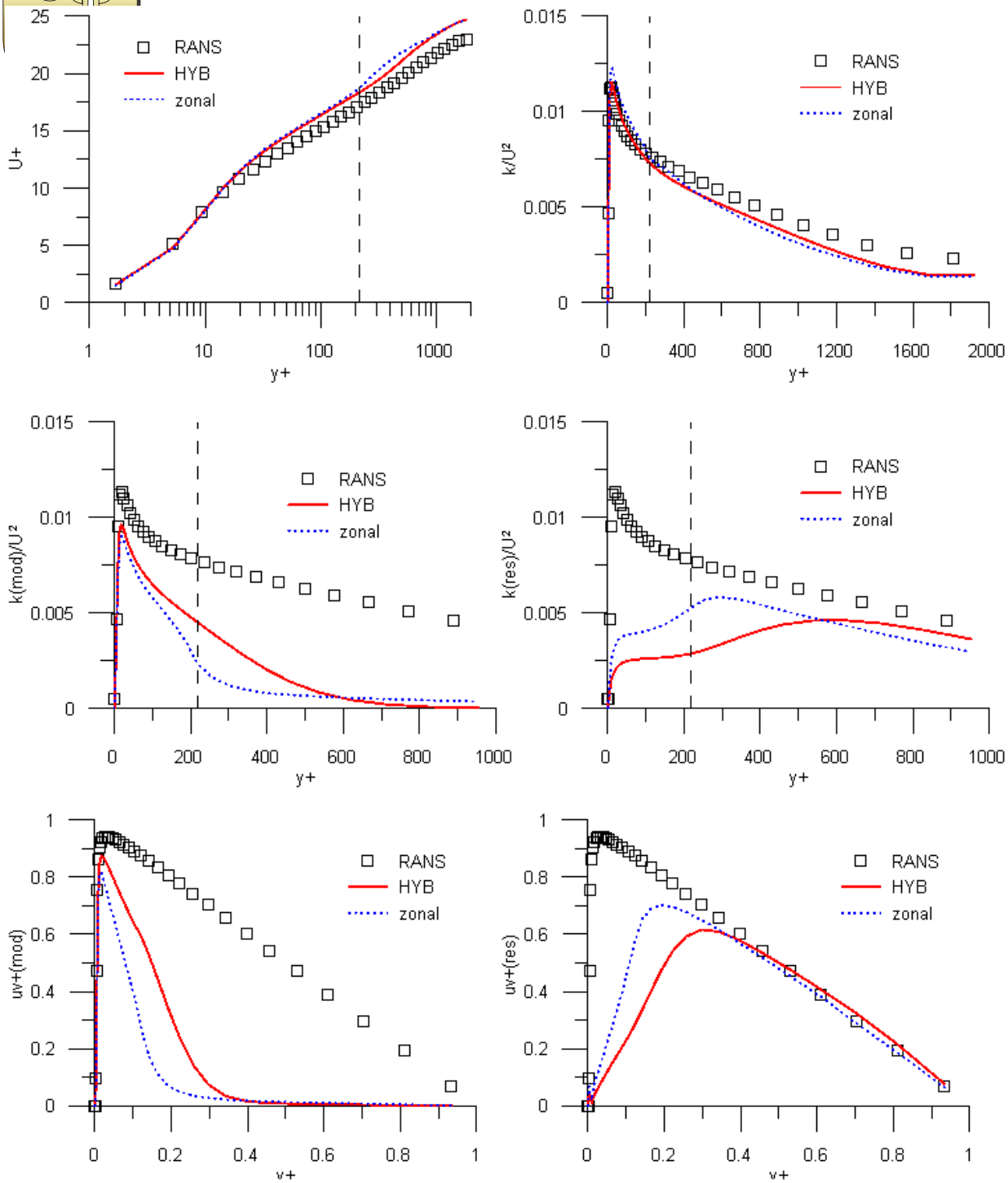


Гибридный RANS/LES подход

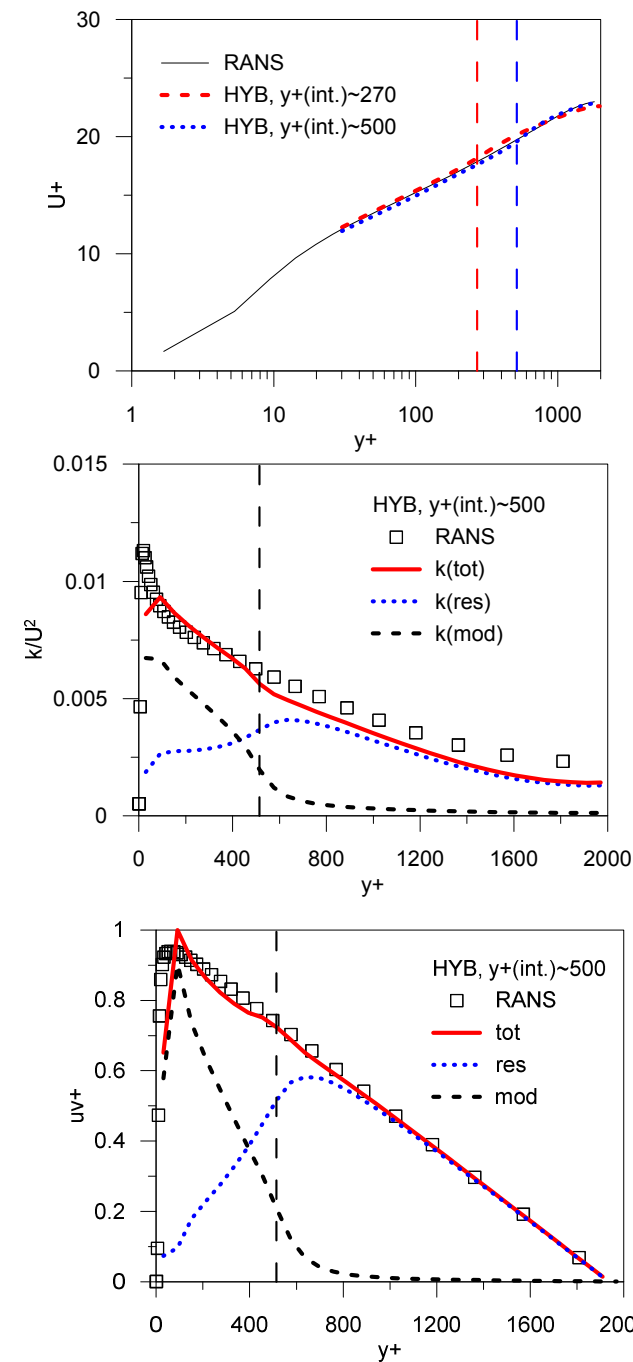
канал $Re_\tau = 2000$



первый пристеночный узел $y^+ = 28$

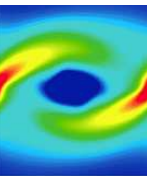


WF + RANS + LES





Задачи



Течения неньютоновских сред

1. RANS модель турбулентности
2. Прямое численное моделирование турбулентности
2. Обтекание сферы

RANS и LES моделирование турбулентных течений

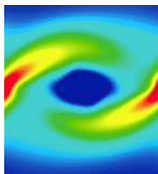
1. Течение в гидротурбине
2. Каверна с подвижной крышкой
3. Модельные закрученные течения

Дисперсные потоки

1. Моделирование движения частиц в турбулентном потоке



Обобщённая ньютоновская реологическая модель



$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T}$$

$$\mathbf{T} = 2\mu(\dot{\gamma})\mathbf{S}, \quad S_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \dot{\gamma} = \sqrt{2\mathbf{S} \cdot \mathbf{S}} = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

Тензор вязких напряжений, тензор скоростей деформации и его второй инвариант

Реология – модель Гершеля–Балкли

$$\begin{cases} \tau = k \dot{\gamma}^n + \tau_0, & \tau \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \tau < \tau_0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} k - \text{индекс консистенции,} \\ n - \text{показатель степени среды,} \\ \tau_0 - \text{предельное напряжение сдвига} \end{array}$$

$\tau = |\mathbf{T}|$

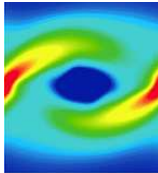
кажущаяся вязкость

$$\mu(\dot{\gamma}) = \frac{k \dot{\gamma}^n + \tau_0}{\dot{\gamma}}$$

- псевдопластическая среда (степенная среда) $n \leq 1, \tau_0 = 0$
- вязкопластическая среда $n = 1, \tau_0 > 0$
- нелинейная вязкопластическая среда $n \leq 1, \tau_0 > 0$



1. Модель турбулентности для степенной среды



k - ε - ζ - f RANS model (Hanjalić et al. 2004) Неньютоновские слагаемые:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

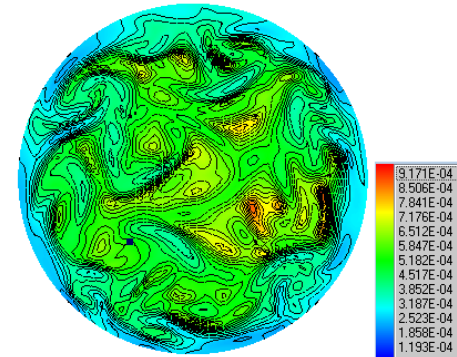
$$\rho \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} = -\nabla p + \nabla \cdot [2(\mu + \mu_t) \mathbf{S}] + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_N \quad \boldsymbol{\tau}_N = 2 \langle \mu' \mathbf{S}' \rangle$$

$$\rho \mathbf{U} \cdot \nabla (k) = \nabla \cdot [(\mu + \mu_t / \sigma_k) \nabla k] + P - \rho \varepsilon + (D_N + \Gamma_N) \quad \Gamma_N = -2 \langle \mu' S'_{ij} \rangle S_{ij}$$

$$\rho \mathbf{U} \cdot \nabla (\varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{1}{T} (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) + E_N \quad D_N = \frac{\partial}{\partial x_k} [\langle \mu' u'_i \rangle 2S_{ki} + \langle \mu' u'_i 2S'_{ki} \rangle]$$

$$\rho \mathbf{U} \cdot \nabla (\zeta) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\zeta} \right) \nabla \zeta \right] + \rho f - \frac{\zeta}{k} P - \frac{\zeta}{k} (D_N + \Gamma_N)$$

$$L^2 \nabla^2 f - f = \frac{1}{T} \left(\zeta - \frac{2}{3} \right) \left(C_{1f} - 1 + C_{2f} \frac{P}{\rho \varepsilon} \right) \quad \mu_t = \rho C_\mu k T \zeta$$



Течение в трубе, $n=0.8$,
Re = 5300, мгновенная
вязкость,

$$\langle \mu \rangle \neq \mu \left(\left\langle \frac{\partial U}{\partial y} \right\rangle \right)$$

Замыкание модели:

$$\mu' = \frac{\partial \mu}{\partial \dot{\gamma}} \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial \mathbf{S}} \cdot \mathbf{S}' = (n-1) \frac{2\mu}{\dot{\gamma}^2} \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}'$$

$$\boldsymbol{\tau}_N = C_N 2\mu_N \mathbf{S} \quad \mu_N = (n-1) \rho \varepsilon / \dot{\gamma}^2$$

$$\Gamma_N = -C_N \mu_N S^2 \quad D_N = \nabla \cdot \left[C_N \frac{(n-1) \mu S^2}{\dot{\gamma}^2} \nabla k \right]$$

$$E_N = C_{\varepsilon N} \frac{C_{\varepsilon 1}}{T} (D_N + \Gamma_N) \quad C_N, C_{\varepsilon N} = const$$

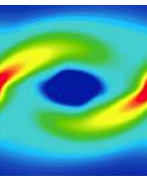
Модель осредненной вязкости:

$$\begin{cases} \mu = \mu(\dot{\gamma}) \\ \dot{\gamma}^2 = S^2 + \rho \varepsilon / \mu \end{cases}$$

$$\mu = k_v (\dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}} \quad \text{степенная среда}$$



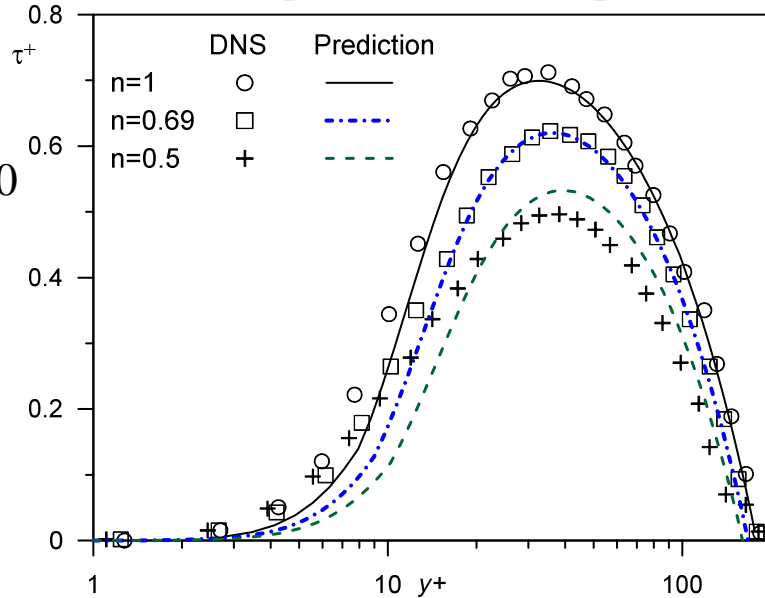
1. RANS модель для степенной среды



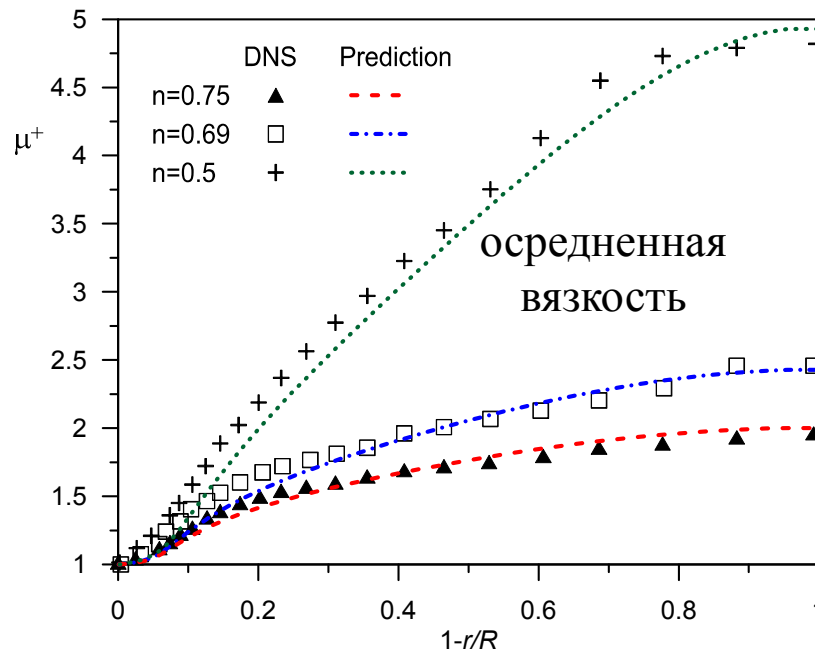
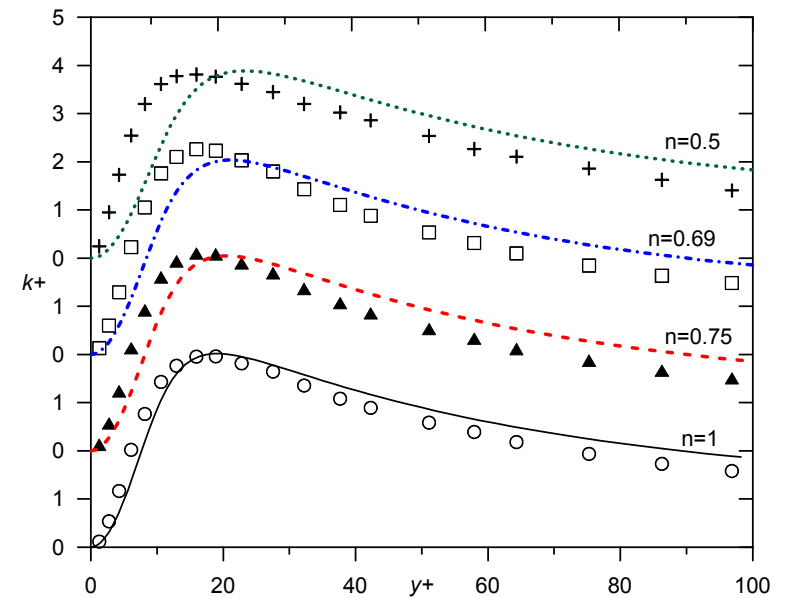
течение в трубе

$$Re = \rho U 2R / \mu_w = 5500$$

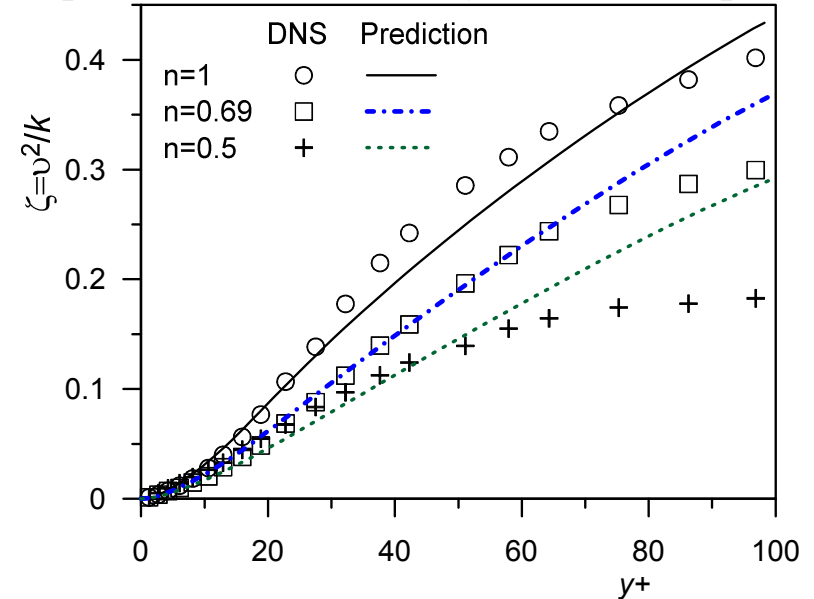
сдвиговые турбулентные напряжения



кинетическая энергия турбулентности



нормальные к стенке пульсации скорости v^2

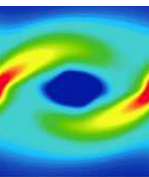


M. Rudman, H.M. Blackburn, L.J.W. Graham, L. Pullum, Turbulent pipe flow of shear-thinning fluids // JNNFM, 2004.

M. Rudman, H.M. Blackburn, Direct numerical simulation of turbulent non-Newtonian flow using a spectral element method // AMM, 2006.

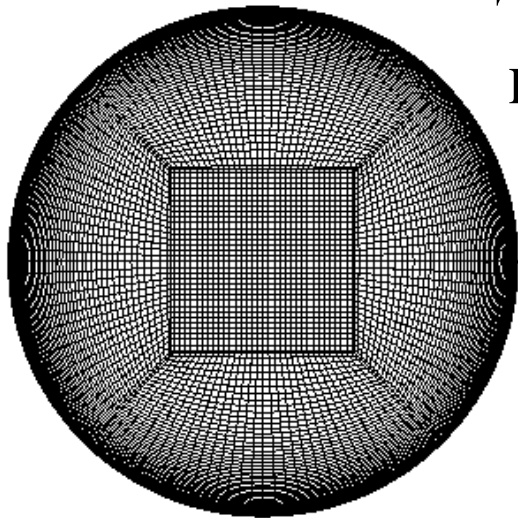


2. Прямое численное моделирование (DNS) турбулентных течений неньютоновских сред

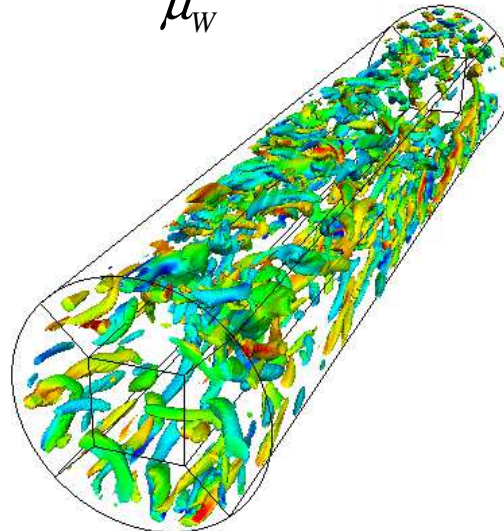


Две серии расчётов:

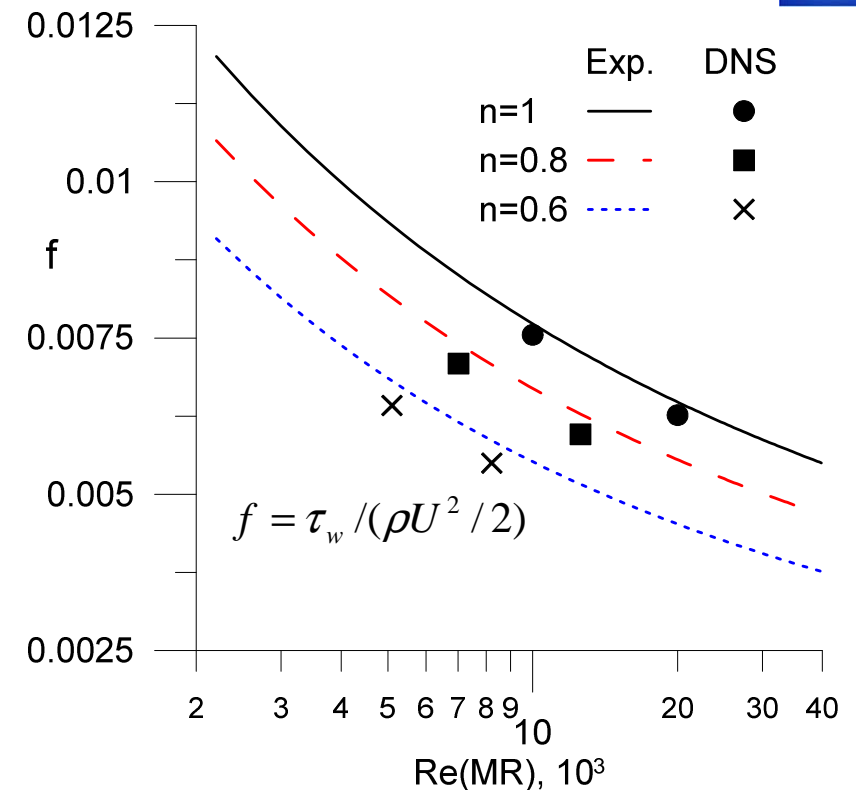
$$\text{Re}_m = \frac{\rho U_m 2R}{\mu_w} = 10^4, 2 \times 10^4$$



длина канала $L_z = 15R$



Детализация конечно-объемной сетки $\Delta x^+ = \rho u_\tau \Delta x / \mu_w$



Число Re	Δr^+	$\Delta(r\theta)^+$ у стенки	Δz^+	полное число ячеек сетки	Δt^+
$\text{Re}=10^4$	от 0.5 до 5	8.7	10	11×10^6	0.3
$\text{Re}=2 \times 10^4$	от 0.5 до 5	8.7	15	45×10^6	0.3

Статистика:

$n=1$

$$T_{ave} \approx 200R / U_m$$

$n<1$

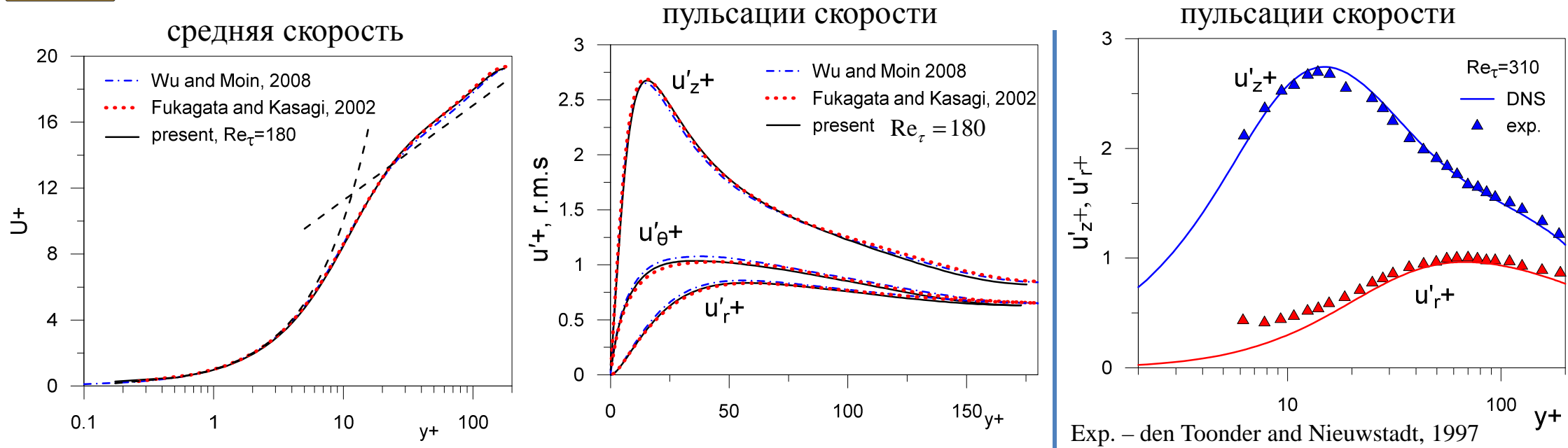
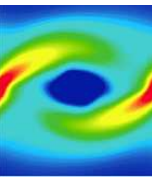
$$T_{ave} \approx (400 \div 600)R / U_m$$

$$\overline{A} = \langle A \rangle = \langle A \rangle_{time, r, \phi}$$



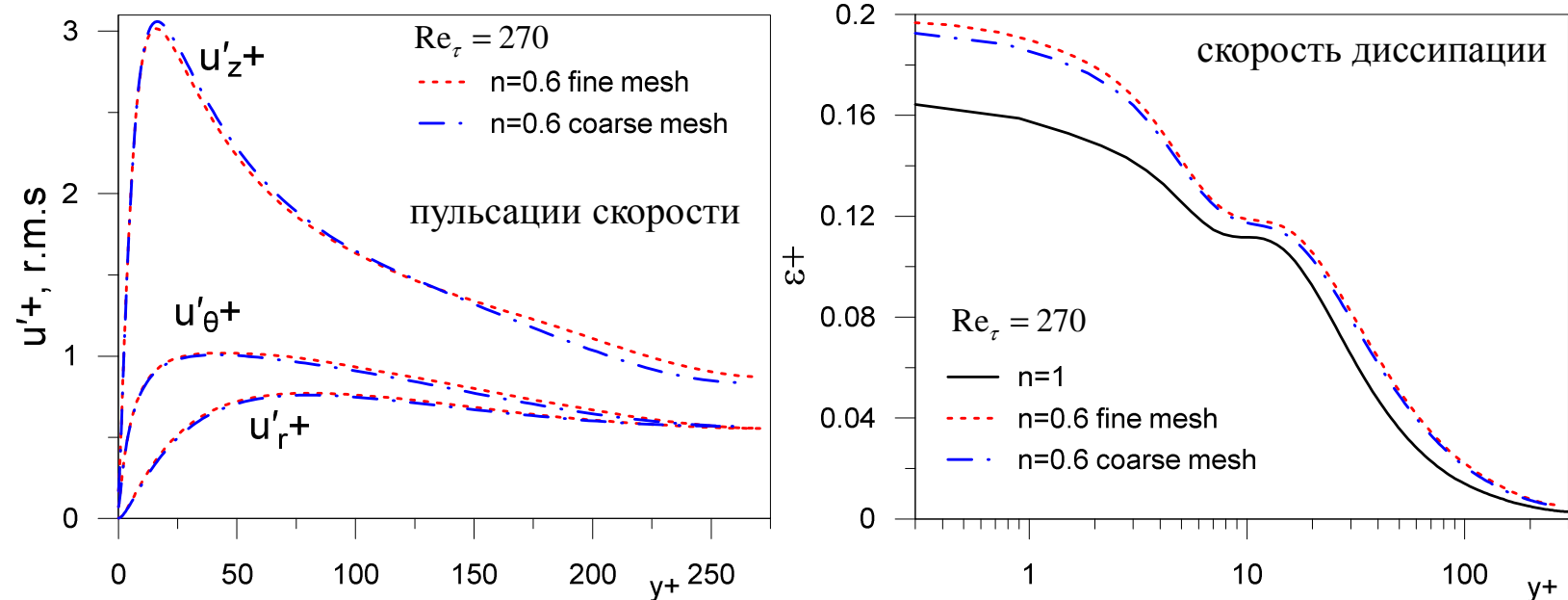
2. DNS. Тестирование. Течение в трубе

$$Re_\tau = \rho u_\tau R / \mu$$



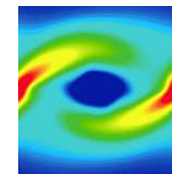
Влияние детализации сетки, $n=0.6$

mesh	Δr^+	$\Delta(r\theta)^+$ у стенки	Δz^+
coarse	0.5–5	8.7	10
fine	0.25–2.5	~4	8

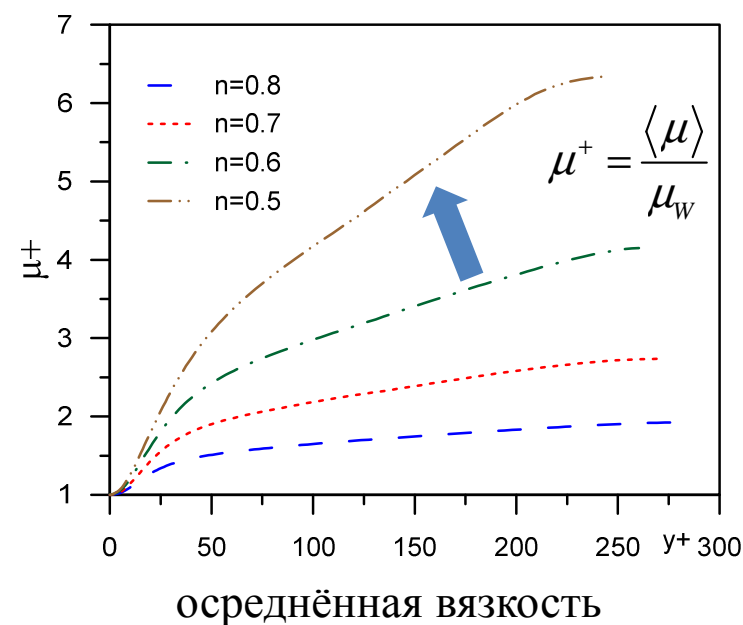
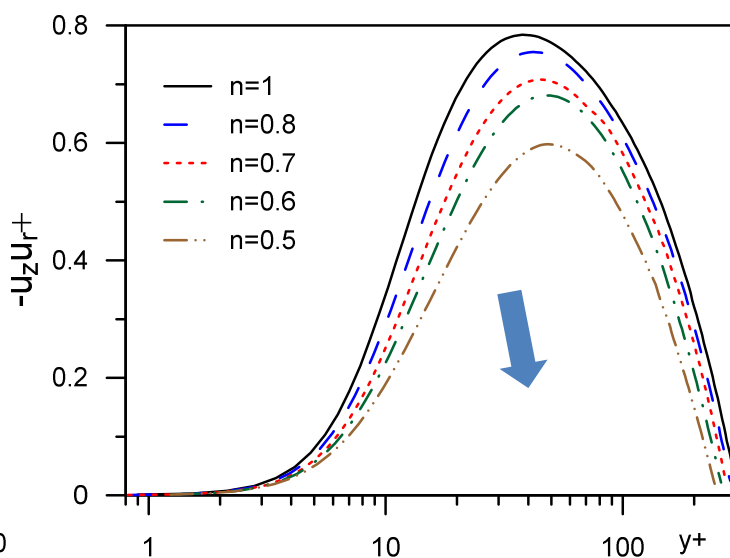
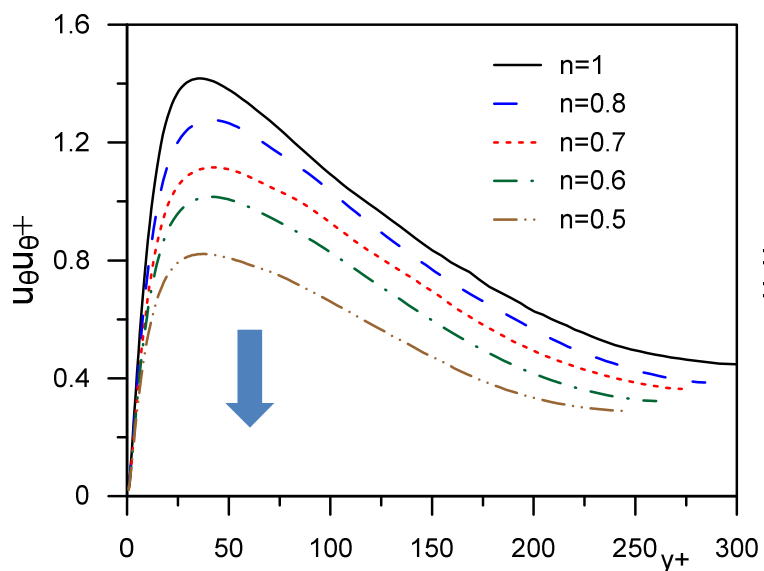
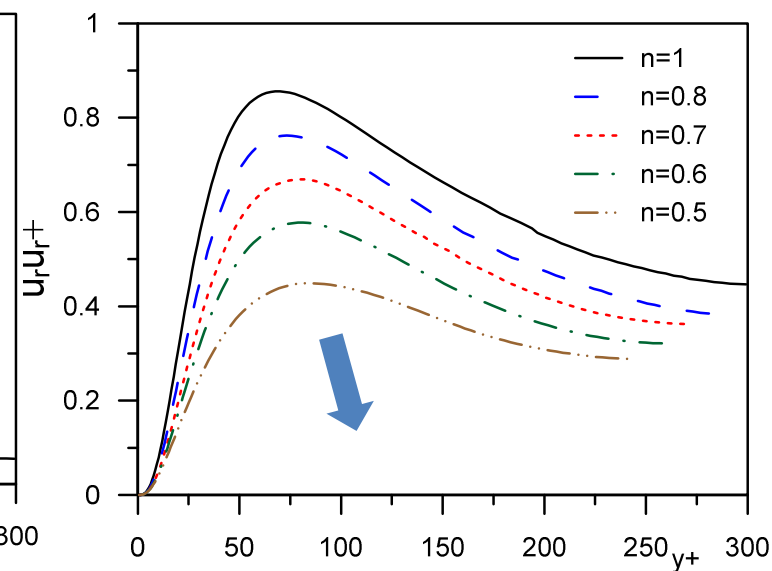
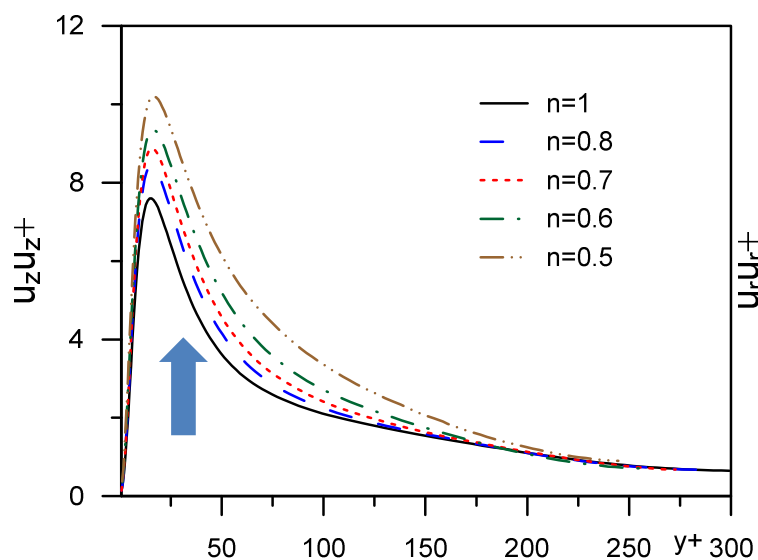
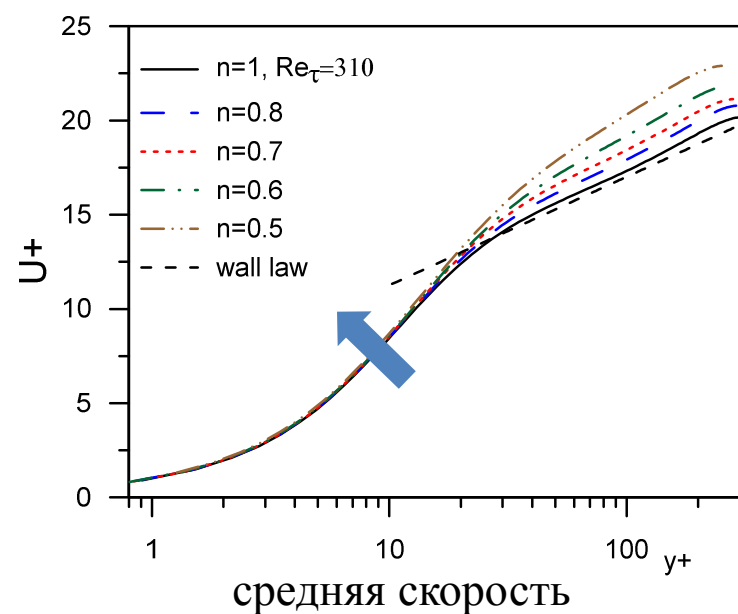


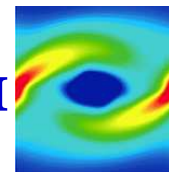


2. DNS. Турбулентная статистика, $Re=10^4$



$n=1.0 \rightarrow n=0.5$





2. DNS. Уравнение баланса турбулентной энергии

мгновенное значение = среднее + пульсационное $\phi = \langle \phi \rangle + \phi'$

- уравнение переноса компонент тензора рейнольдсовых напряжений

$$\rho \mathbf{U} \cdot \nabla \langle u_i u_j \rangle = \rho (P_{ij} + D_{t,ij} + D_{v,ij} - \varepsilon_{ij} + D_{P,ij} + \Phi_{ij} + D_{N,ij} + \Gamma_{N,ij})$$

P – генерация напряжений, D_v – вязкая диффузия, D_t – турбулентный перенос, D_P – диффузия за счет пульсаций давления, Φ – тензор перераспределения энергии и ε тензор скоростей диссипации.

работа неньютоновских напряжений

$$\Gamma_{N,ij} = - \left\langle \mu' \frac{\partial u_i}{\partial x_k} 2S_{kj} \right\rangle - \left\langle \mu' \frac{\partial u_j}{\partial x_k} 2S_{ki} \right\rangle$$

диффузия за счет пульсаций

ВЯЗКОСТИ

$$D_{N,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\langle \mu' u_i 2S_{kj} \rangle + \langle \mu' u_j 2S_{ki} \rangle \right]$$

- уравнение переноса кинетической энергии турбулентных пульсаций

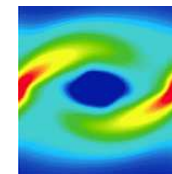
$$\rho \mathbf{U} \cdot \nabla (k) = \rho (P + D_t + D_v - \varepsilon + D_P + D_N + \Gamma_N)$$

$$\rho \varepsilon = \mu \langle 2S'_{ij} S'_{ij} \rangle + \langle \mu' 2S'_{ij} S'_{ij} \rangle$$

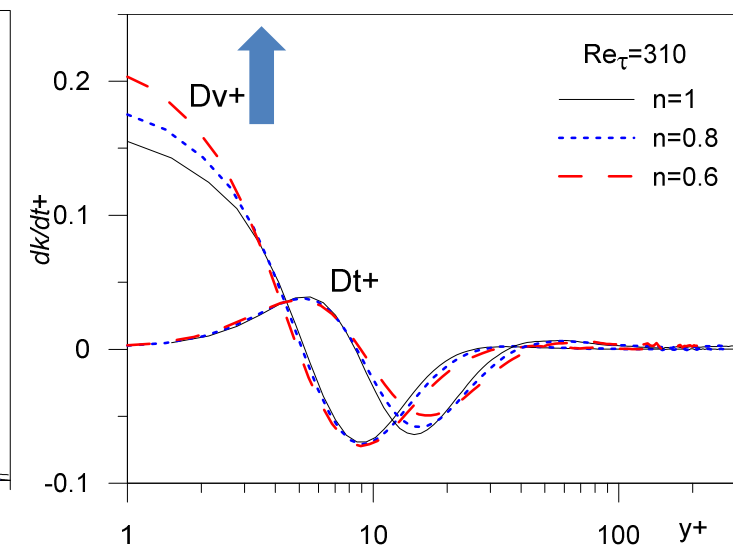
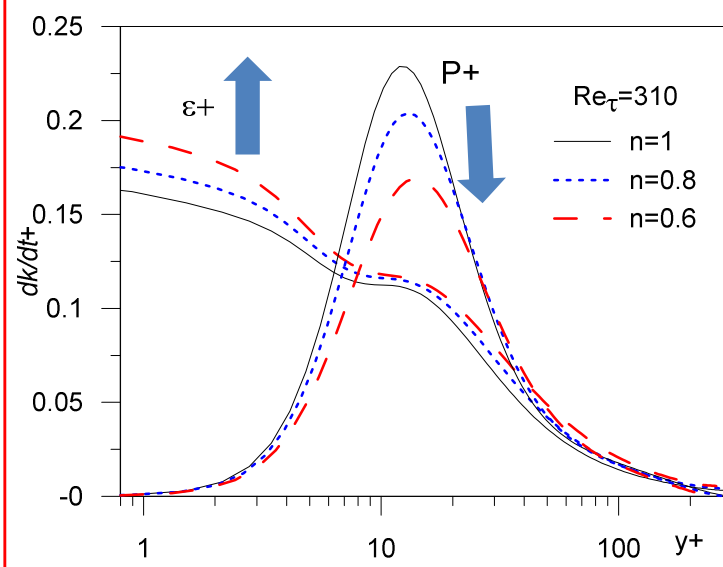
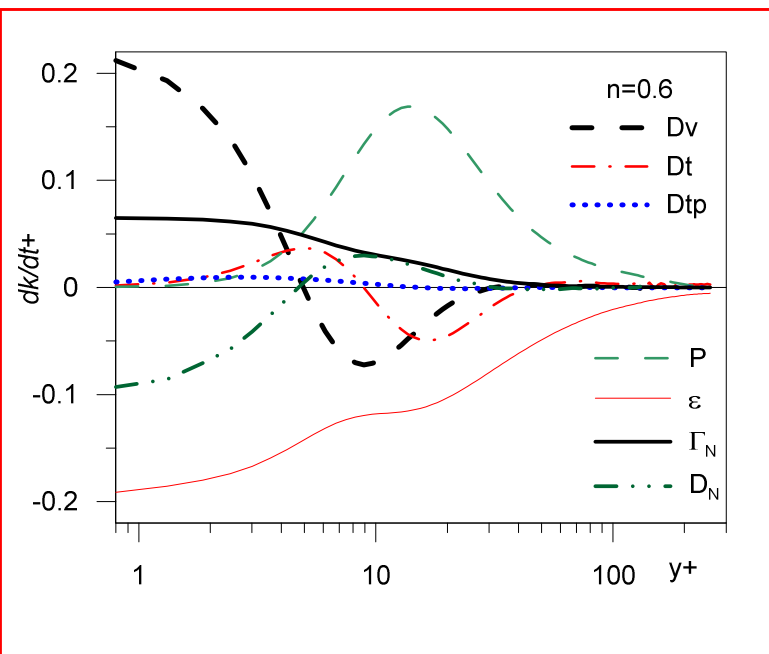
$$\Gamma_N = -2 \langle \mu' S'_{ij} \rangle S_{ij} \quad D_N = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\langle \mu' u_i \rangle 2\bar{S}_{ki} + \langle \mu' u_i 2S'_{ki} \rangle \right]$$



2. Уравнение баланса турбулентной энергии

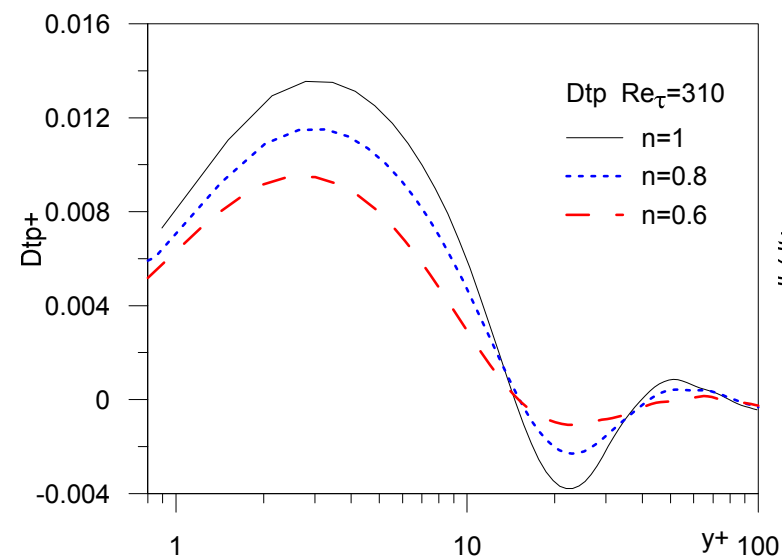


$n=1.0 \rightarrow n=0.6$

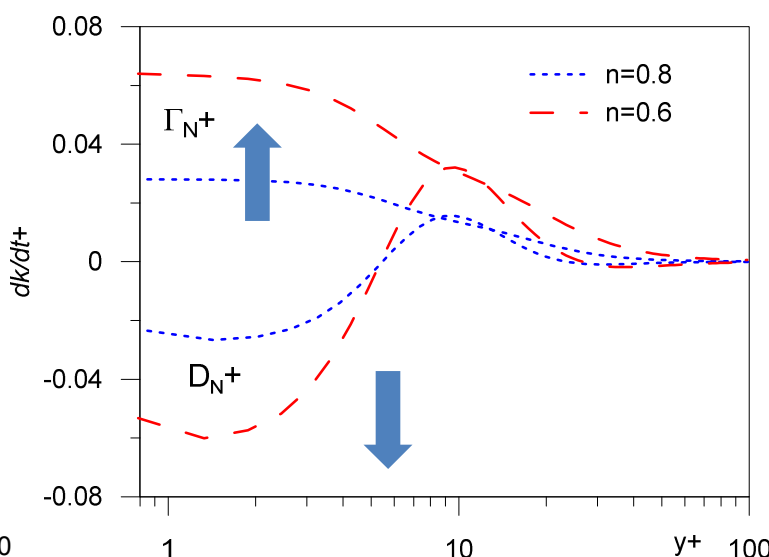


генерация и диссипация

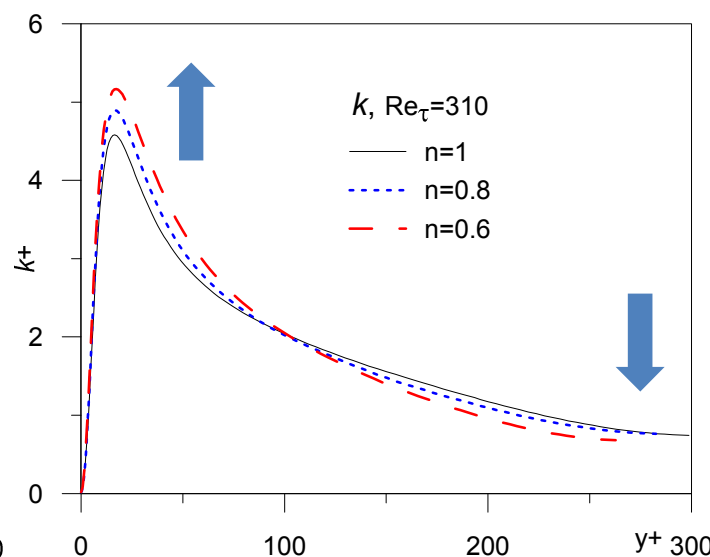
вязкая и турбулентная диффузии



диффузия за счет пульсаций давления

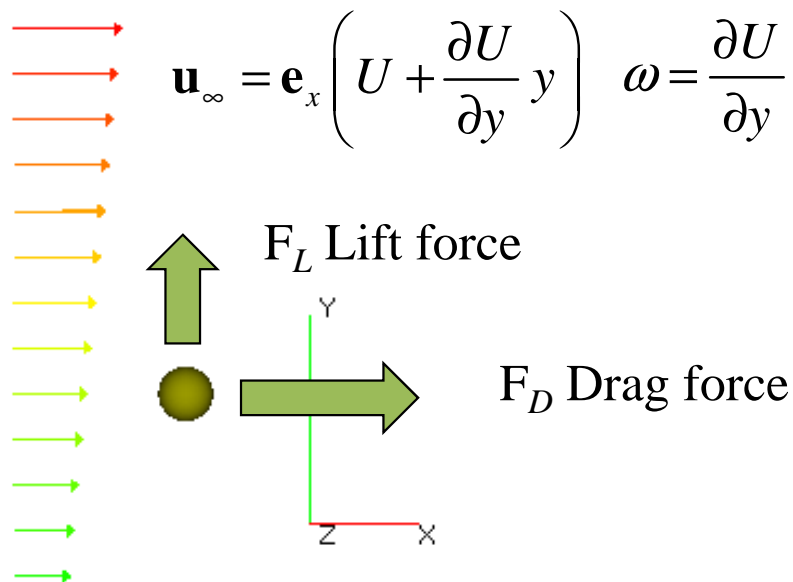
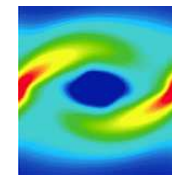


неньютоновские члены





3. Обтекание сферы потоком неньютоновской среды



скорость невозмущенного
потока в центре сферы

U

диаметр сферы

d

характерная скорость сдвига

$\dot{\Gamma} = U/d_p$

показатель степени

n

число Бингама

$Bn = \frac{\tau_0}{k\dot{\Gamma}^n}$

число Рейнольдса

$Re = \frac{\rho U d}{\mu_{app}(\dot{\Gamma})} = \frac{\rho U d}{k\dot{\Gamma}^{n-1}}$

сдвиговое число Рейнольдса

$Re_s = \frac{\rho d^2 \omega}{\mu_{app}(\omega)} = \frac{\rho d^2 \omega^{2-n}}{k}$

Безразмерная характерная
скорость сдвига

$s = \frac{Re_s}{Re} \quad s_{Newt} = \frac{\omega d}{U}$

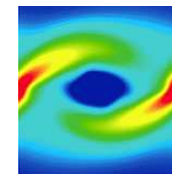
- $\omega=0$ обтекание бессдвиговым потоком
- $\omega>0$ сфера в потоке с линейным сдвигом

Диапазон изменения параметров:

- $0.3 \leq n \leq 1$
- $0 \leq Bn \leq 100$
- $0 < Re \leq 200$
- $0 \leq s \leq 1$

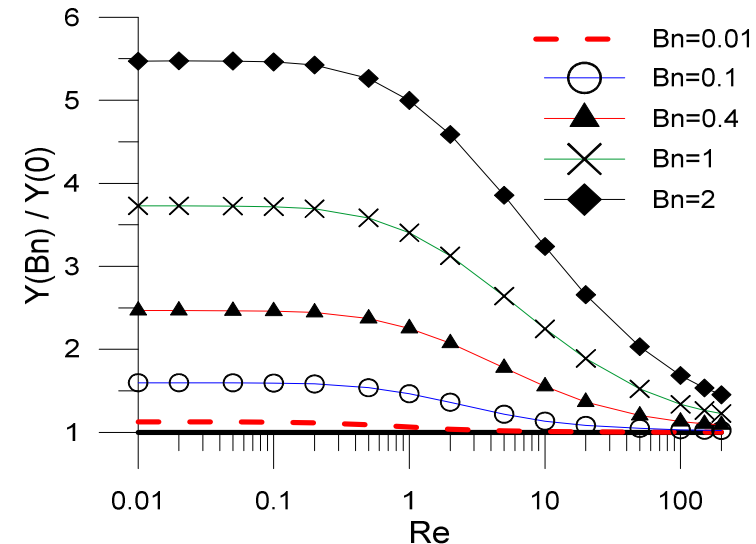
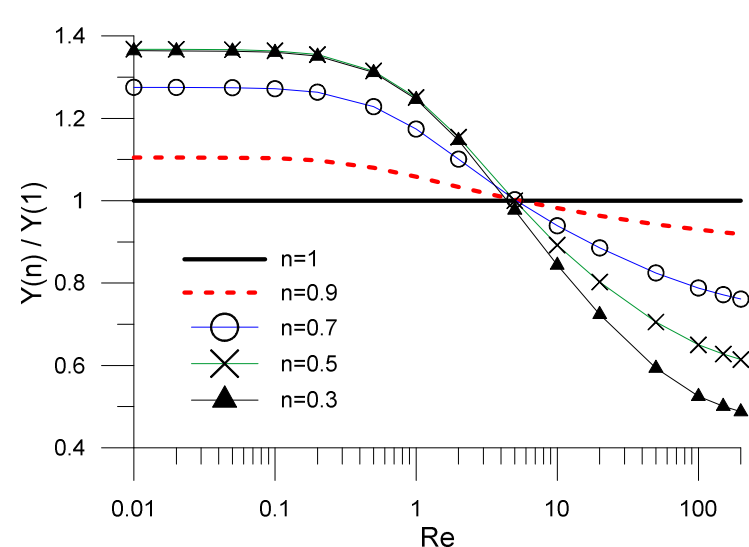
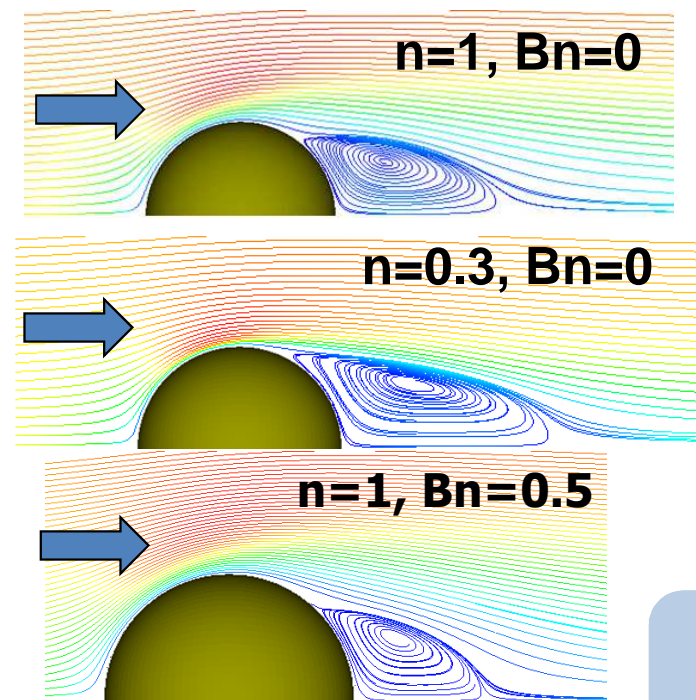


3. Обтекание сферы бессдвиговым потоком



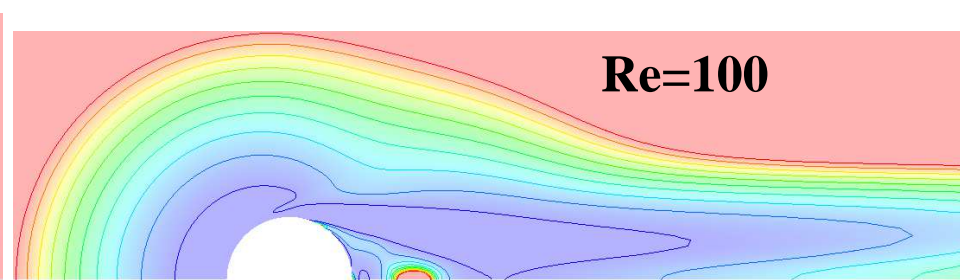
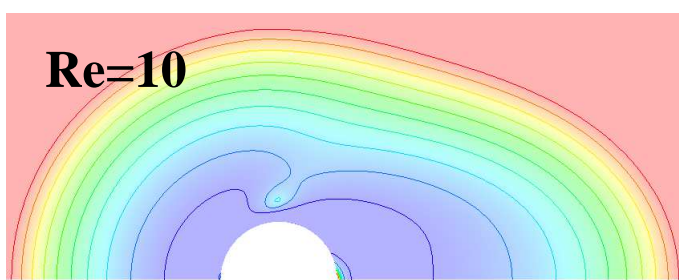
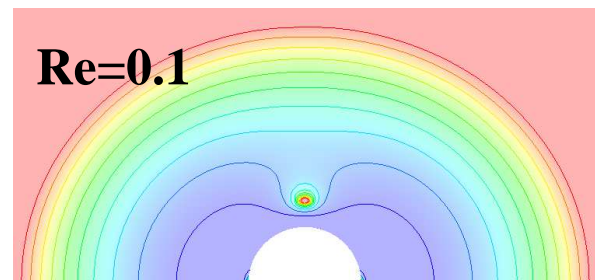
Re=100

Сила сопротивления $Y(n) = \frac{C_D(n) Re_p}{24}$



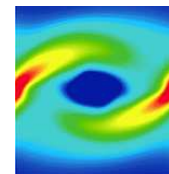
- Уменьшение размеров области возмущенного потока
- Стремление к ползучему типу течения при увеличении числа Bn
- Стремление к ньютоновскому типу обтекания при увеличении Re (Bn<10)

Распределения эффективной вязкости для степенной среды $n=0.3$





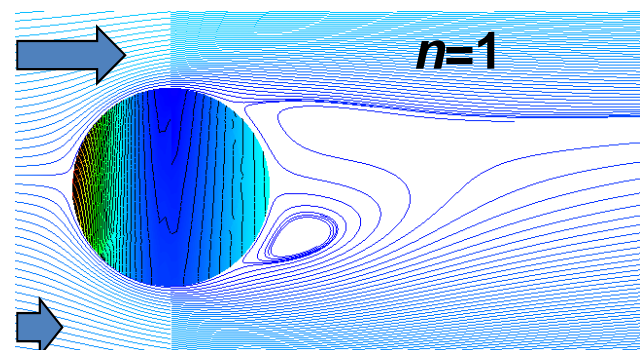
3. Обтекание сферы потоком с линейным сдвигом



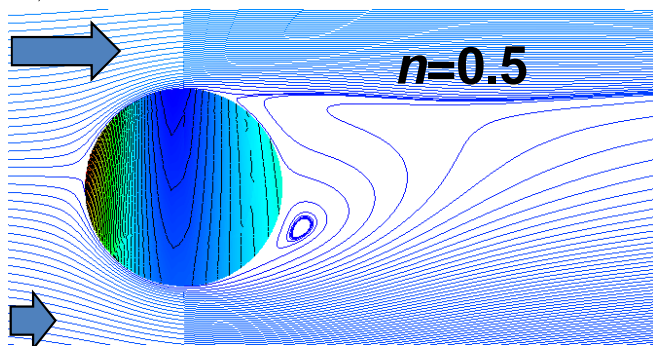
Сила сопротивления $Y(n) = \frac{C_D(n) Re_p}{24}$ $s = \frac{Re_s}{Re_p}$

Линии тока и давление

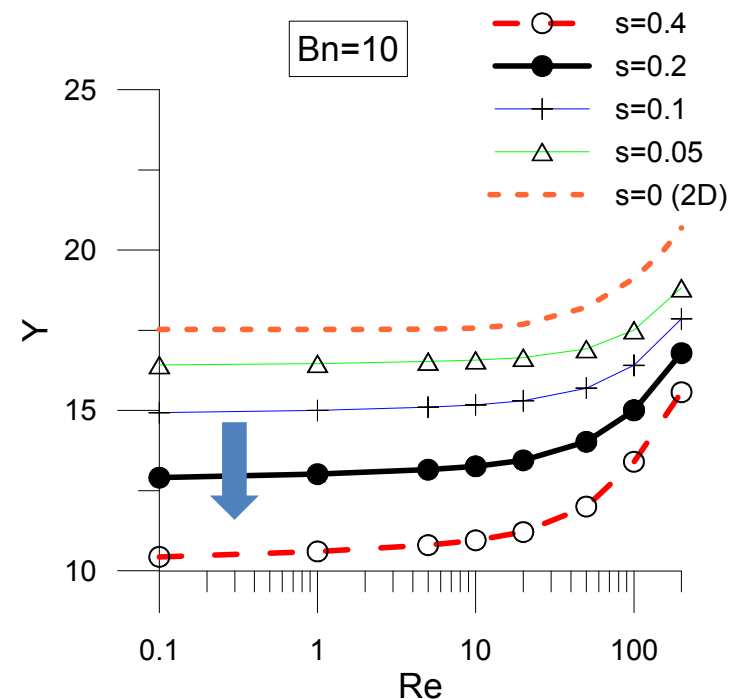
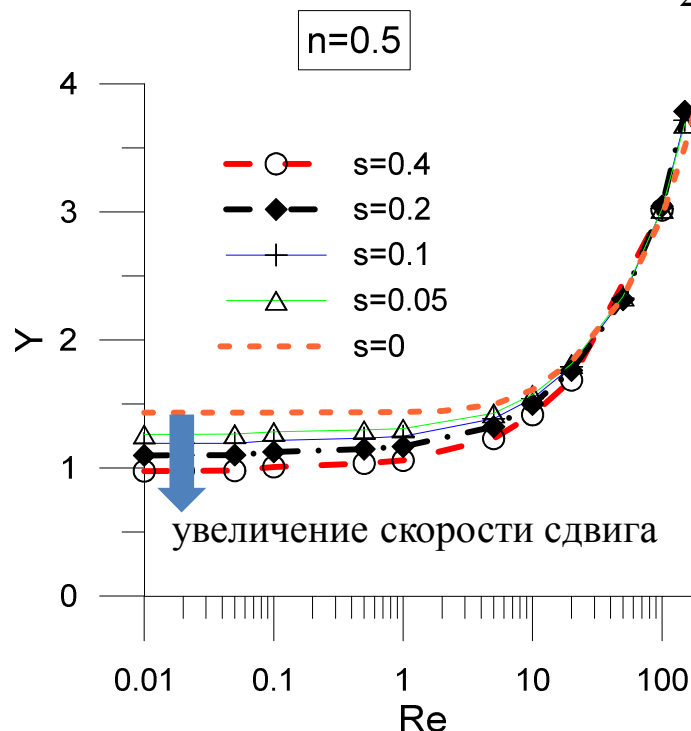
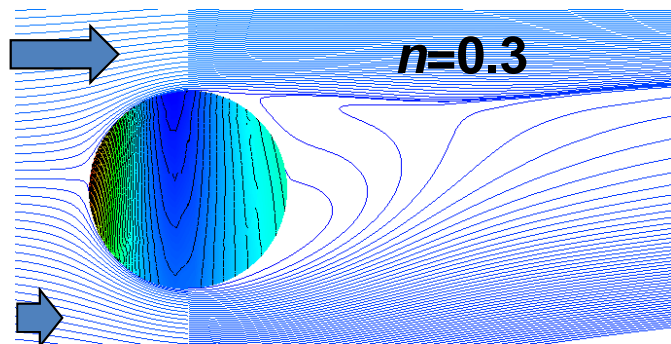
$Re=100$ $s=0.2$



$n=0.5$



$n=0.3$

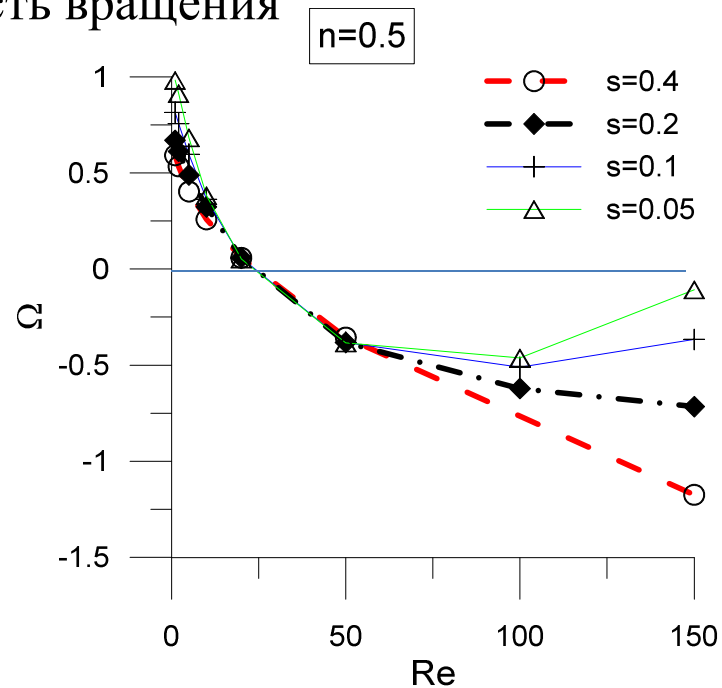
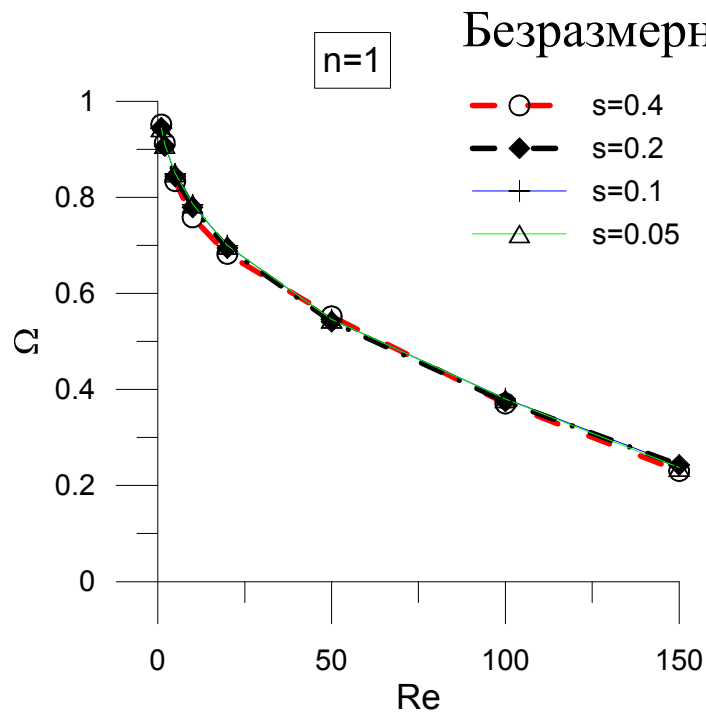
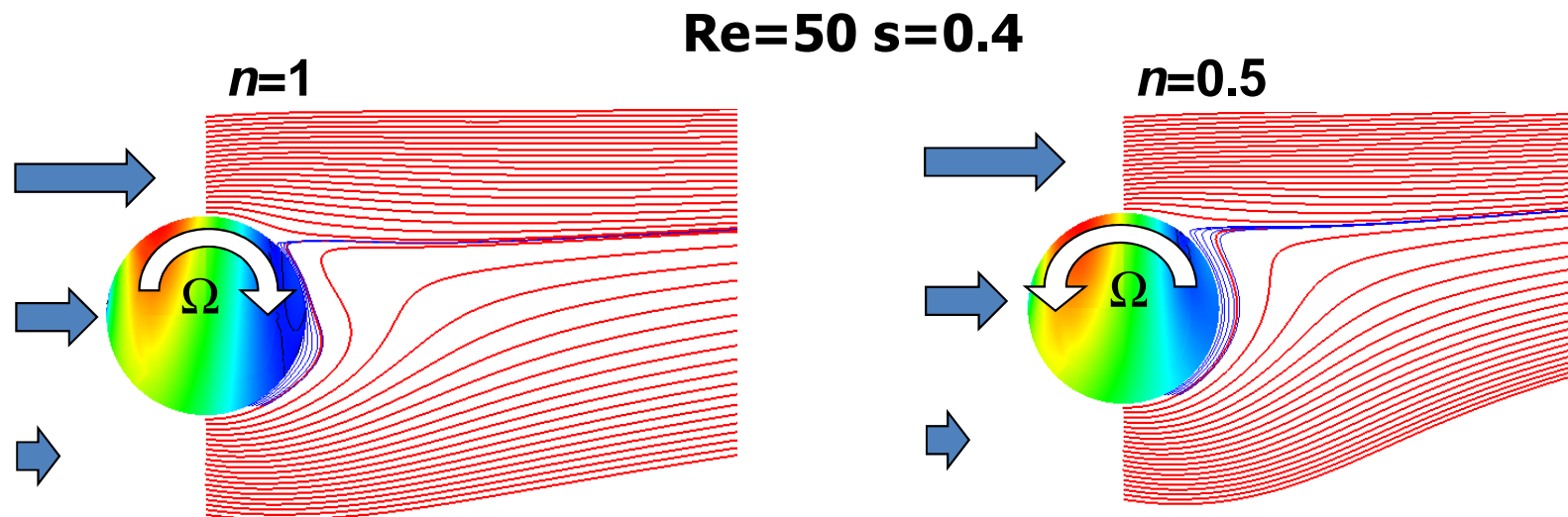
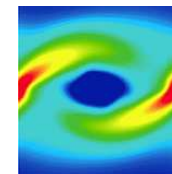


- Подавление вихревых структур за сферой → снижению сопротивления формы и увеличению подъемной силы.
- Зависимость сопротивления от скорости сдвига набегающего потока существенна для режимов малых чисел Re . С увеличением сдвига потока сопротивление уменьшается.
- С увеличением числа Re набегающего потока влияние сдвига потока уменьшается.



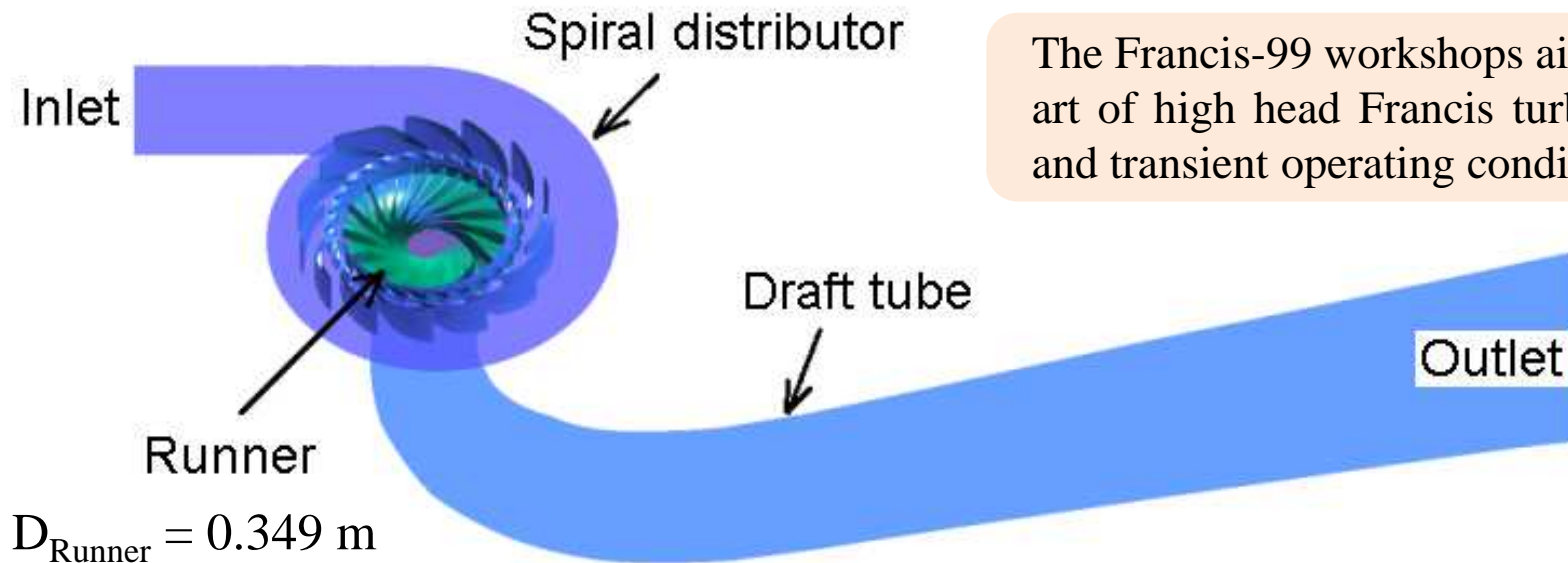
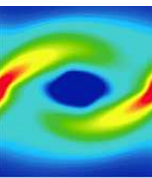
3. Обтекание сферы потоком с линейным сдвигом

Скорость вращения Ω свободной сферы в потоке со сдвигом





4. Моделирование закрученных течений. Модельная гидротурбина Francis-99



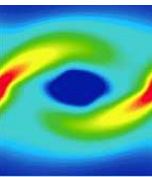
The Francis-99 workshops aim to determine the state of the art of high head Francis turbine simulations under steady and transient operating conditions.

The whole Francis-99 turbine consists of a spiral casing, 14 stay vanes, 28 guide vanes, a runner with 15 full length blades and 15 splitters, and a draft tube.

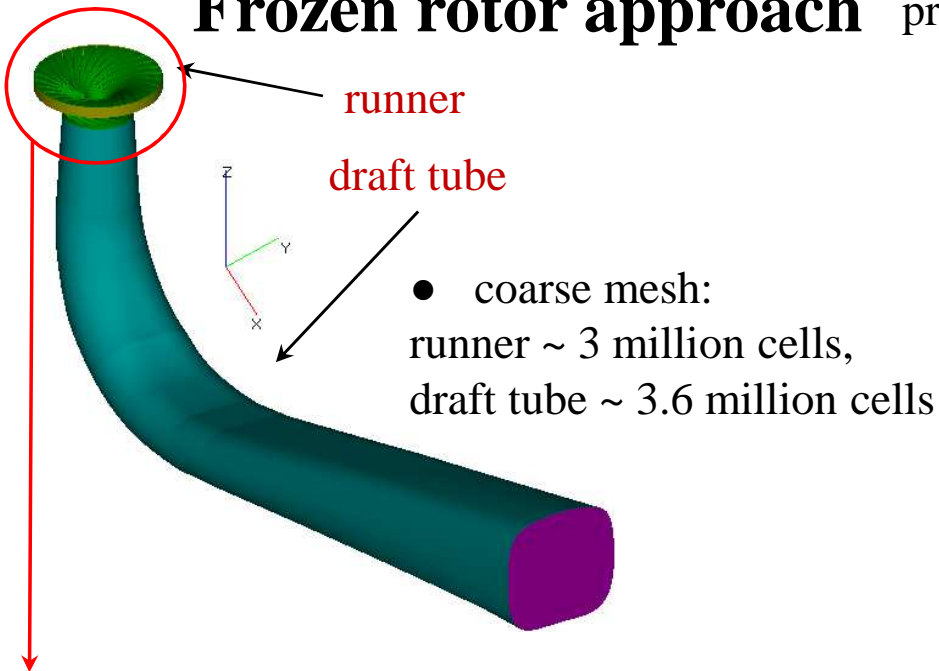
Operating point	Head (m)	Flow rate (m ³ /s)	Runner speed, rad/s (Hz)	Pressure torque, [N*m]	Friction torque, [N*m]	Hydraulic efficiency (%)
Part Load	12.29	0.07	42.537 (6.77)	137.52	6.54	71.69
High Load	12.61	0.22	38.7 (6.16)	598	7.63	90.66
Best Efficiency Point	12.77	0.20	35.123 (5.59)	619.56	8.85	92.61



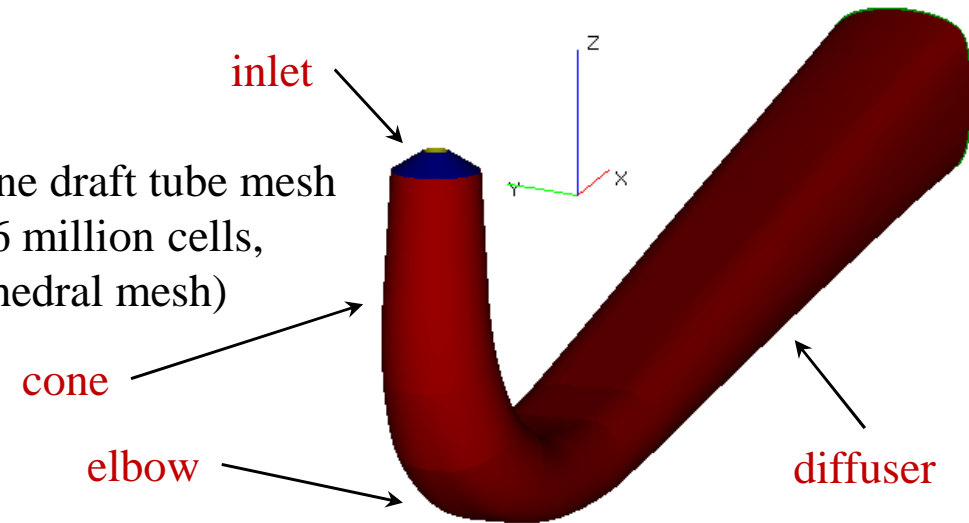
Geometry and mesh for draft tube simulation



Frozen rotor approach provides the inlet conditions for the **Draft tube flow**



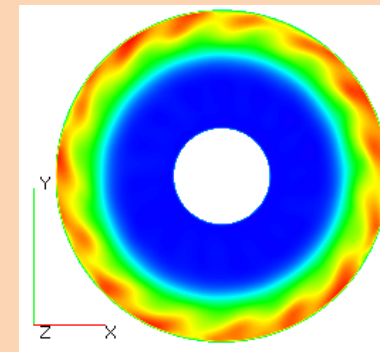
- fine draft tube mesh (~ 5.6 million cells, hexahedral mesh)



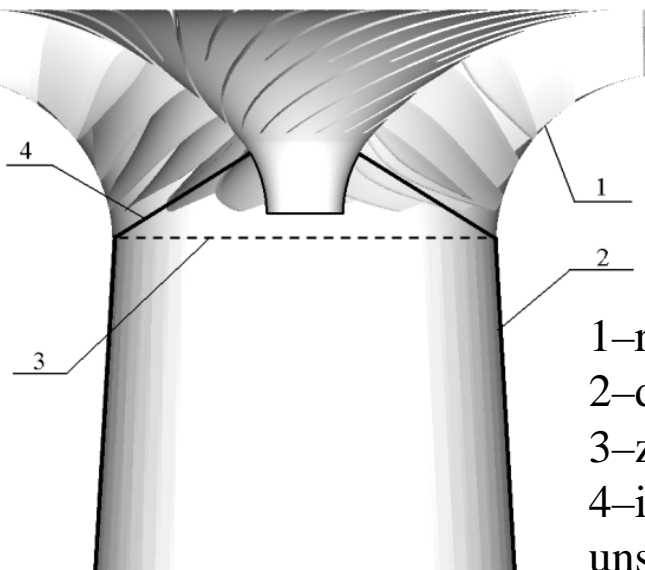
Rotating inlet conditions

After preliminary frozen rotor computation an instantaneous flow fields distributions on the draft tube inlet boundary are stored.

During the computation this inlet distributions are rotated with angular velocity of runner.



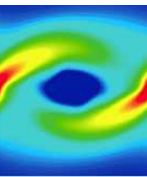
velocity magnitude
on the inlet



1-runner zone,
2-draft tube,
3-zone interface,
4-inlet boundary for
unsteady draft tube
computations



Turbulence models



Reynolds-Averaged Approach (RANS, URANS)

1. Elliptic relaxation eddy viscosity model $k-\varepsilon-\zeta-f$ – **EVM**
(Hanjalic et al., 2004)
2. Differential Reynolds stress model – **RSM**
(Speziale, Sarkar and Gatski, 1991)

Hybrid URANS/LES approach

3. RANS $k-\varepsilon-\zeta-f$ / SGS turbulent kinetic energy transport equation – **HYB**

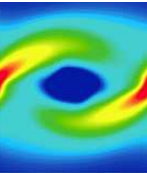
Near-Wall treatment for all models:

Simplified analytical wall function (Popovac and Hanjalic, 2005, 2007)

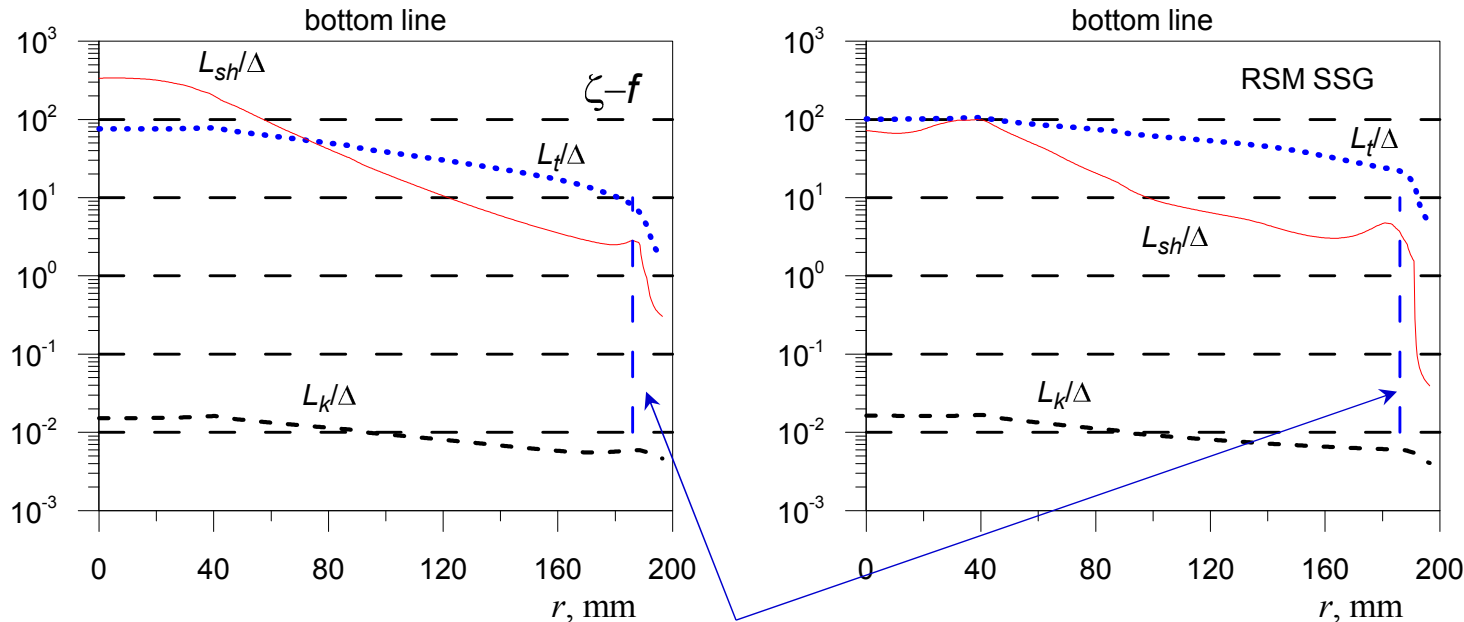
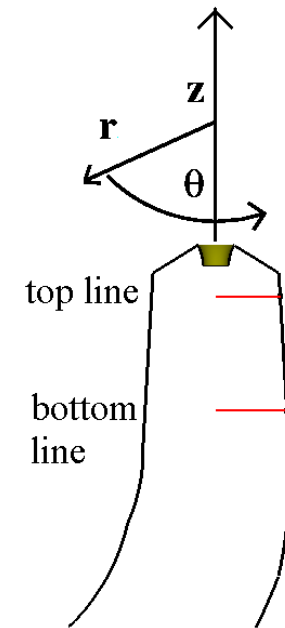
(blending the viscous sublayer formulation and logarithmic layer formulation accounting non-equilibrium effects)



Mesh resolution



The ratios of the **characteristic turbulence length scales to the mesh size** at the bottom reference line:



Vertical dashed lines correspond to the RANS/LES interface positions

Away from a wall:

$\Delta / L_t < 1/12$ at least 80% of the turbulent kinetic energy is resolved by LES

$\Delta / L_{sh} < 1$ resolving the turbulent kinetic energy production

Scales:

$$L_t = k^{3/2} / \varepsilon \quad \text{integral scale}$$

$$L_{sh} = (\varepsilon / S^3)^{1/2} \quad \text{shear length}$$

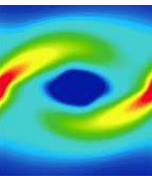
$$L_k = (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4} \quad \text{Kolmogorov scale}$$

$$\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad \text{mesh size}$$

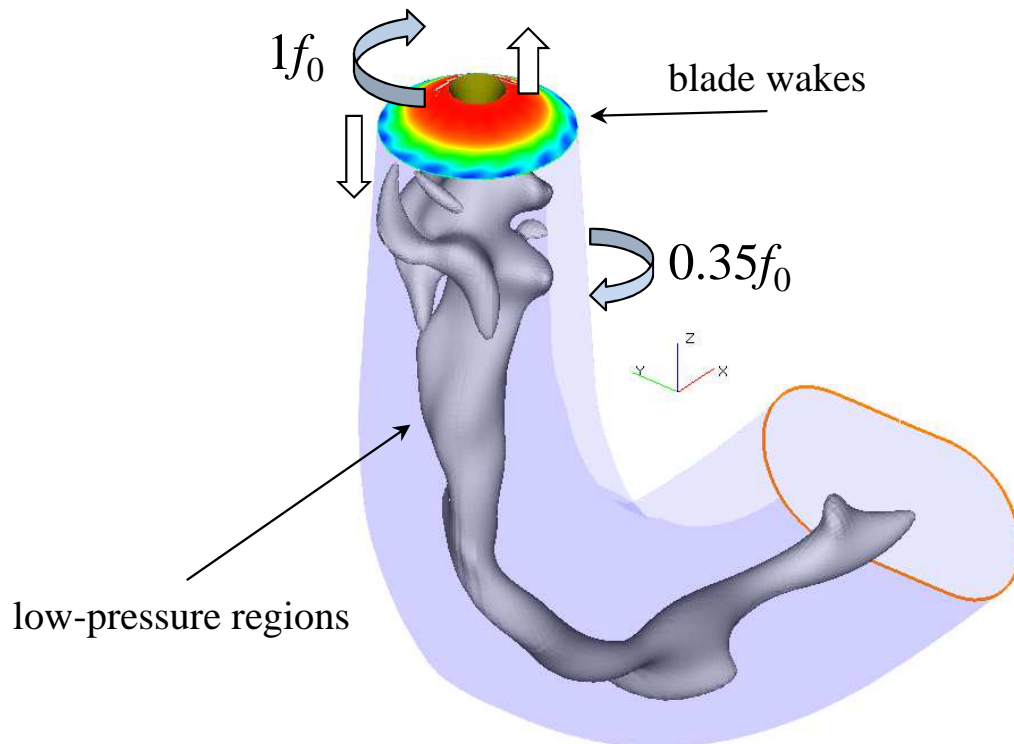
$$S = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$$



Draft tube computations



Operating point	Turbulence models	Numerical schemes	CFL max./ave.	statistical averaging (runner revolutions)
Part Load	EVM (ζ - f)	QUICK, CN	2.6 / 0.5	steady-state
	RSM (SSG)	QUICK, CN	2 / 0.3	110
	HYB	HOCDS, CN	2 / 0.3	310

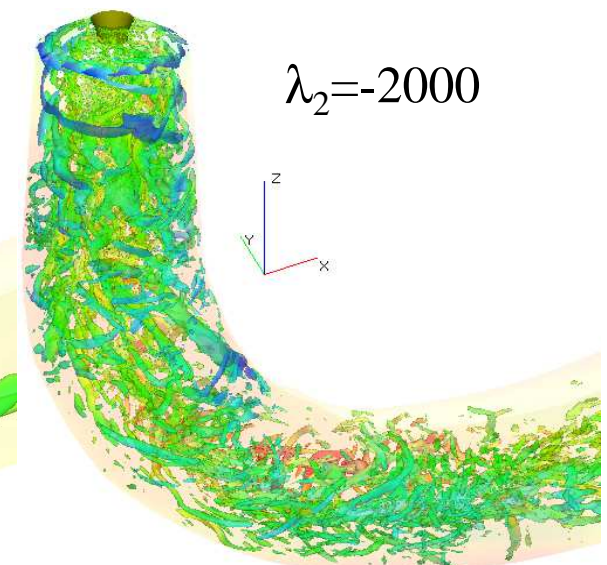
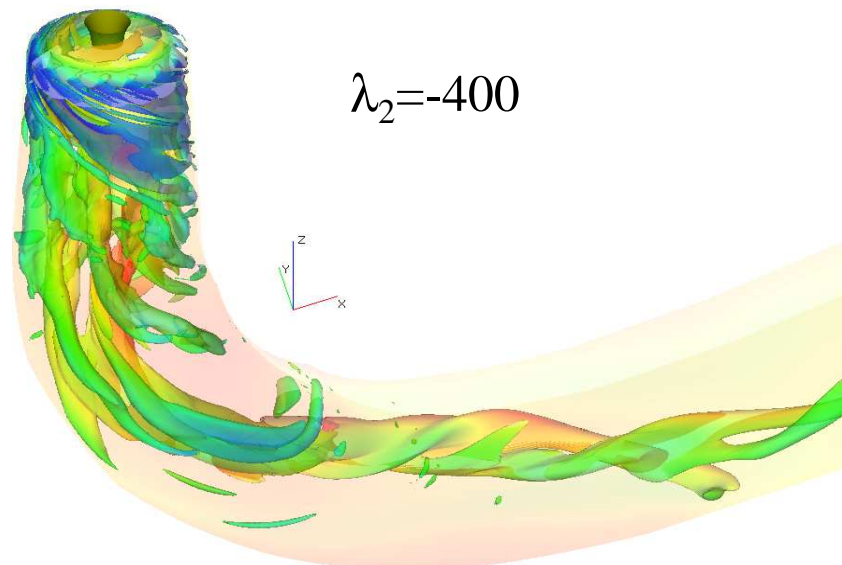
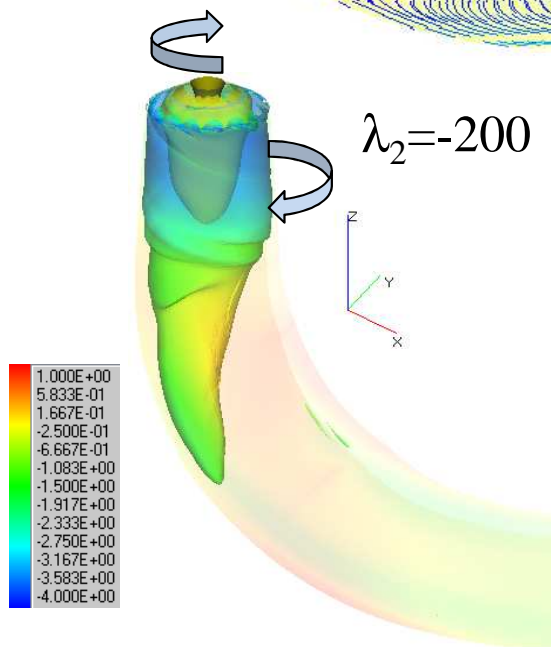
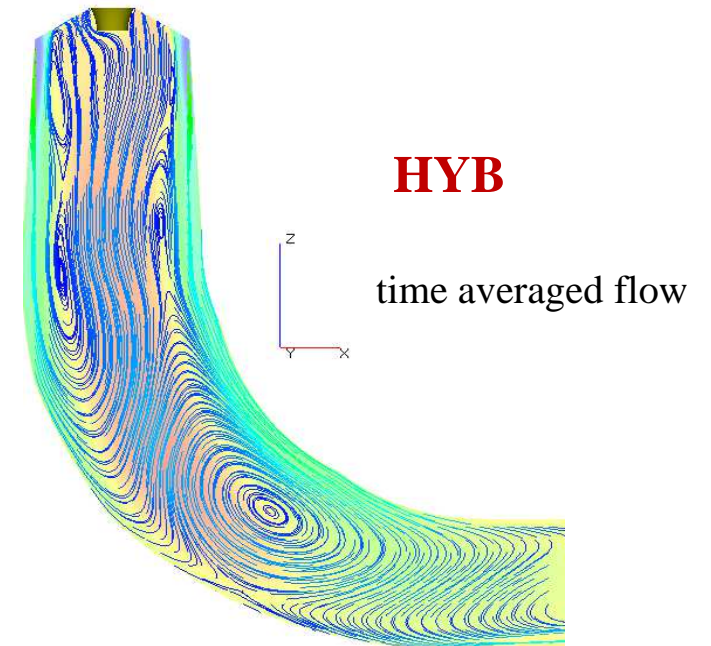
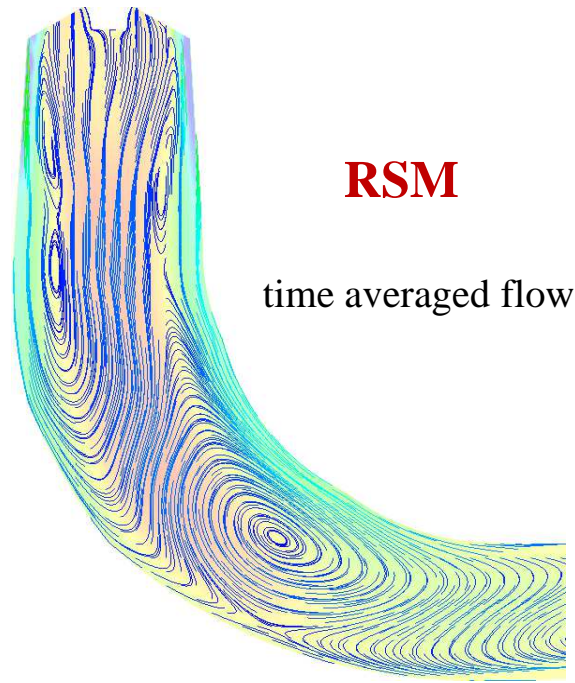
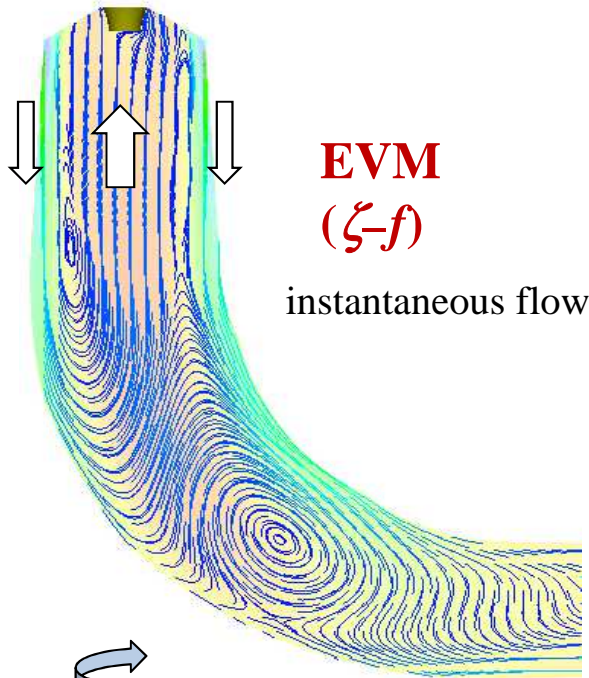
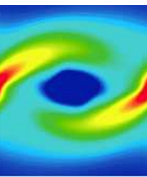


runner speed $f_0 = 6.77$ Hz
throat diameter $D = 0.3466$ m
bulk velocity $U_b = 0.7525$ m/s
kinematic viscosity (water) $\nu = 9.57 \cdot 10^{-7}$ m²/s
Reynolds number $Re_b = 2.7 \times 10^5$



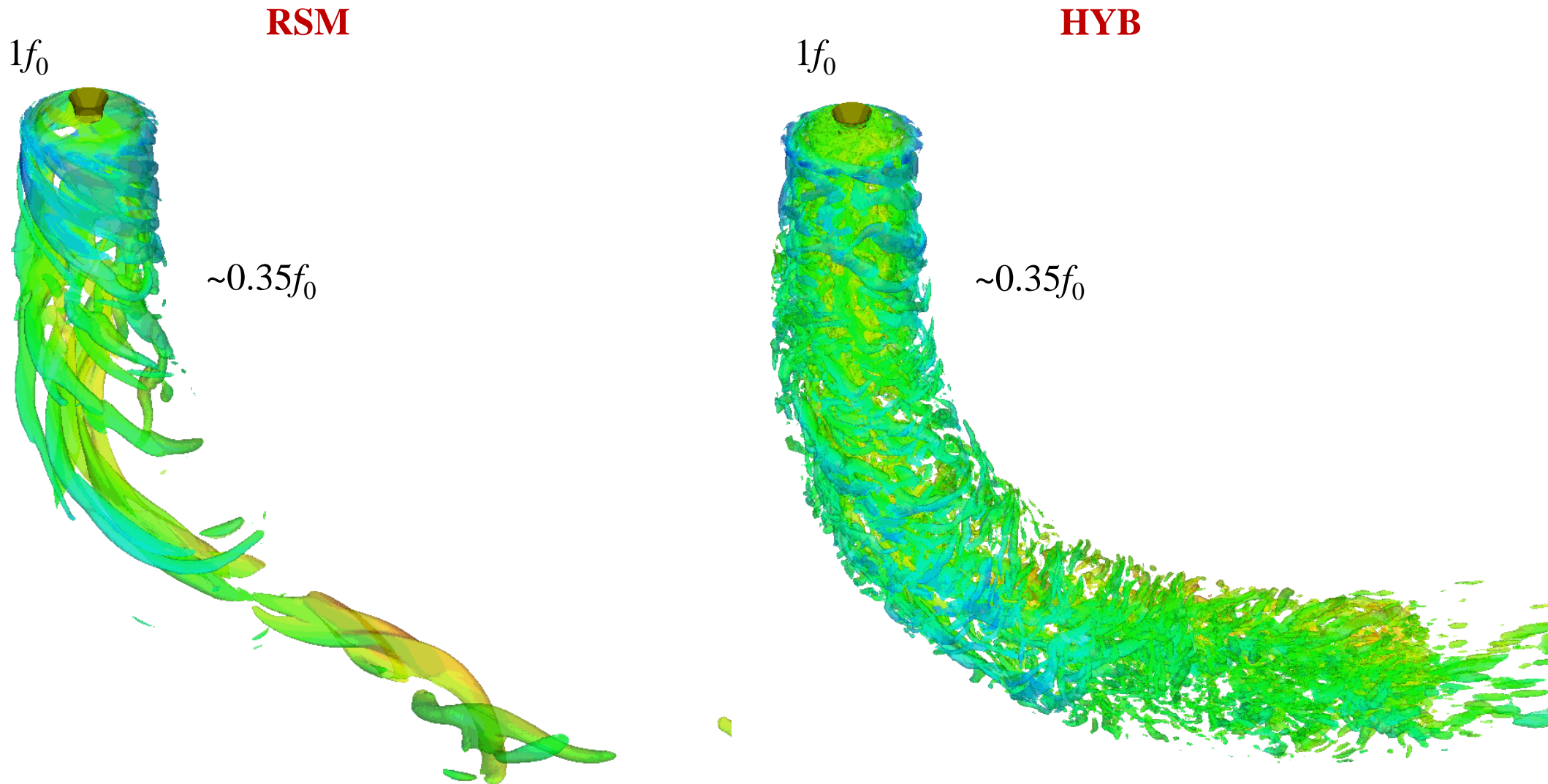
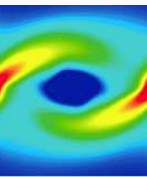
Flow structures

Sectional streamlines at the symmetry plane of the draft tube





Flow structures

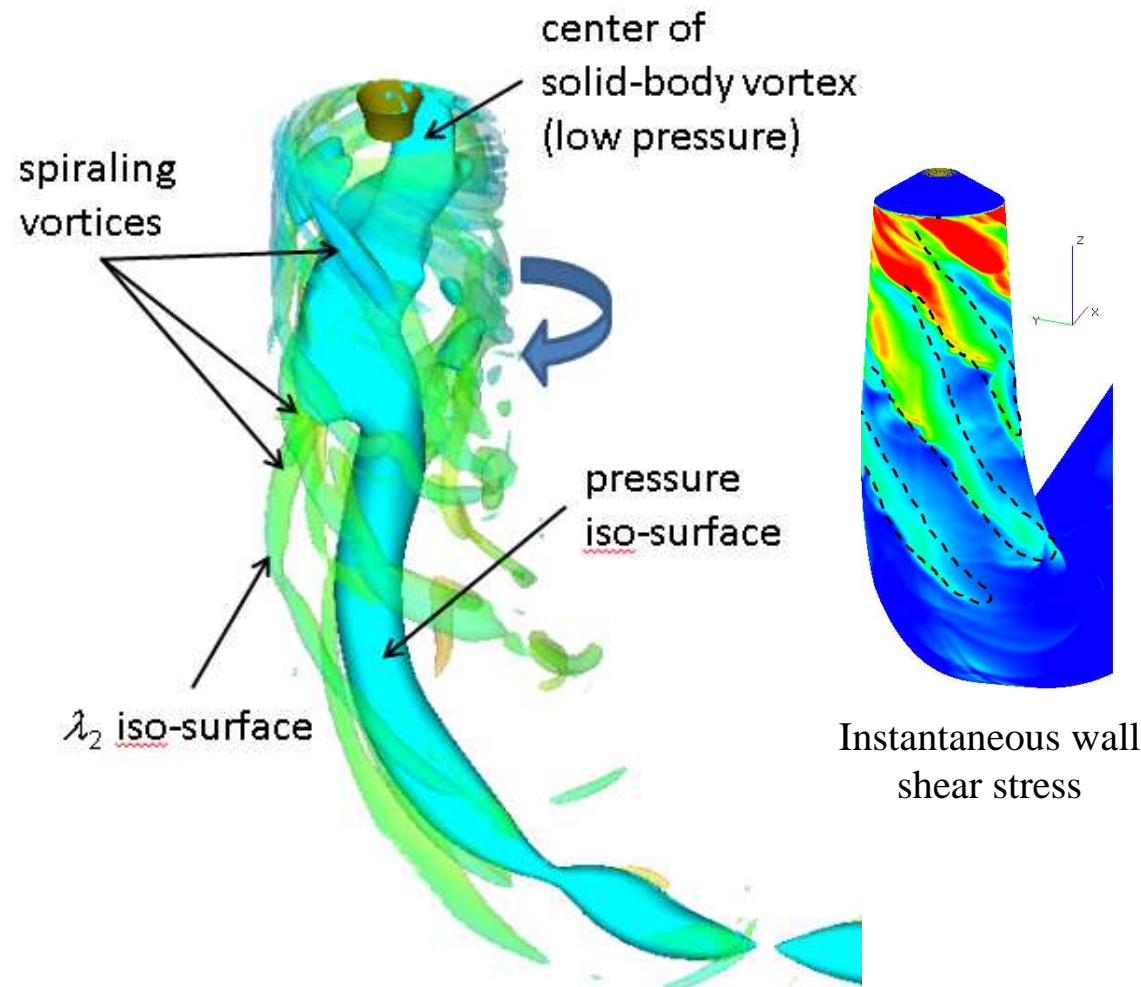


λ_2 vortex criterion colored by axial velocity



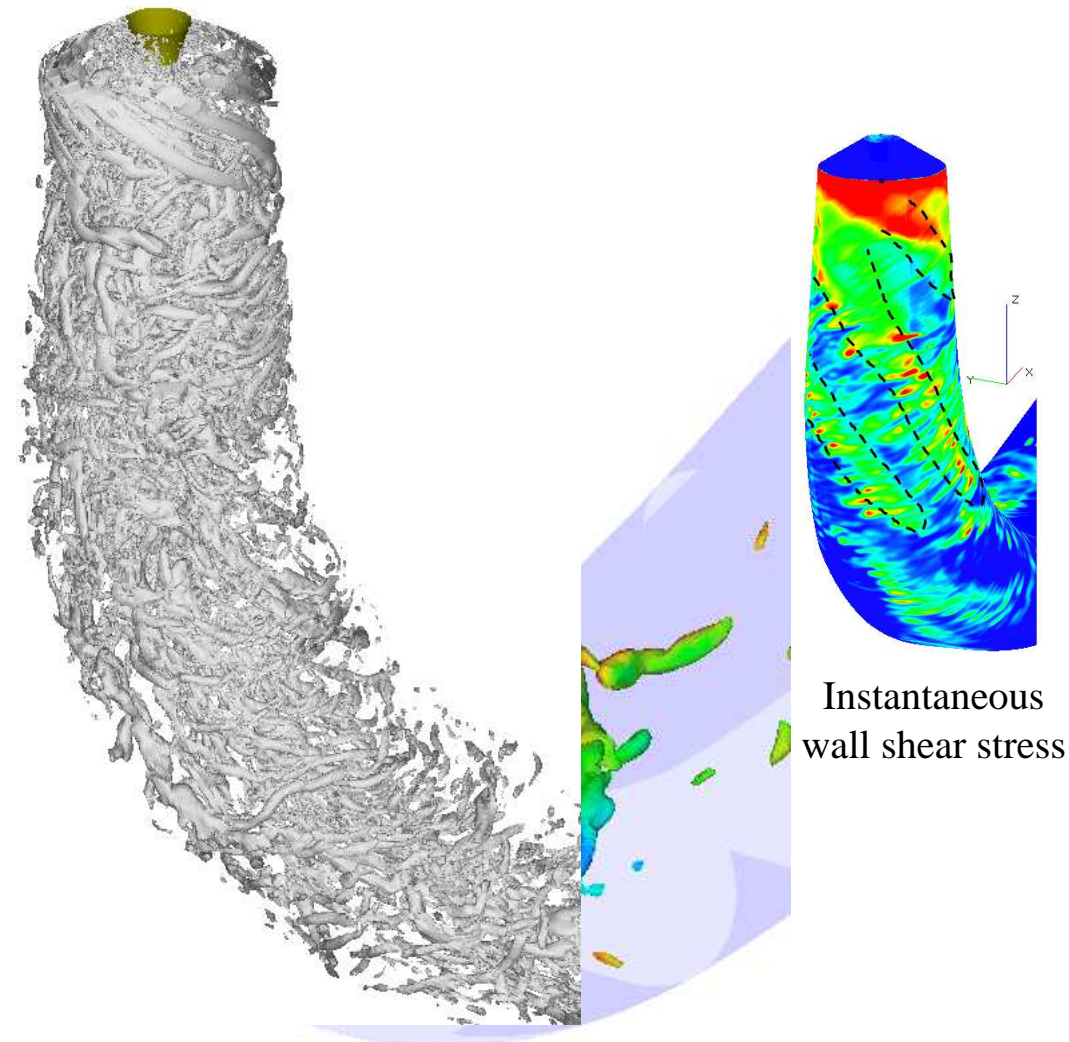
Flow structures

RSM



Main vortex systems: precessing vortex core enveloped by spiraling vortices.

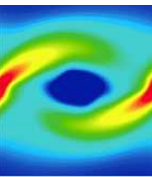
HYB



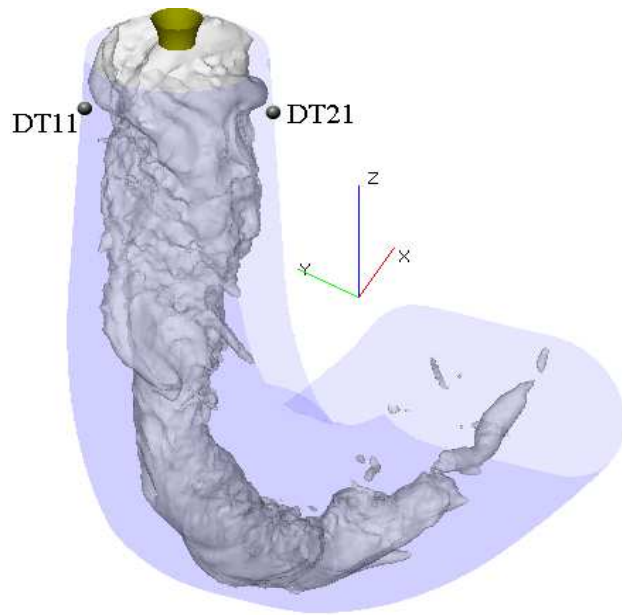
Additionally, filtered, instantaneous vortex structures visualized by Q criterion (colored by axial velocity)



Resolved pressure fluctuations

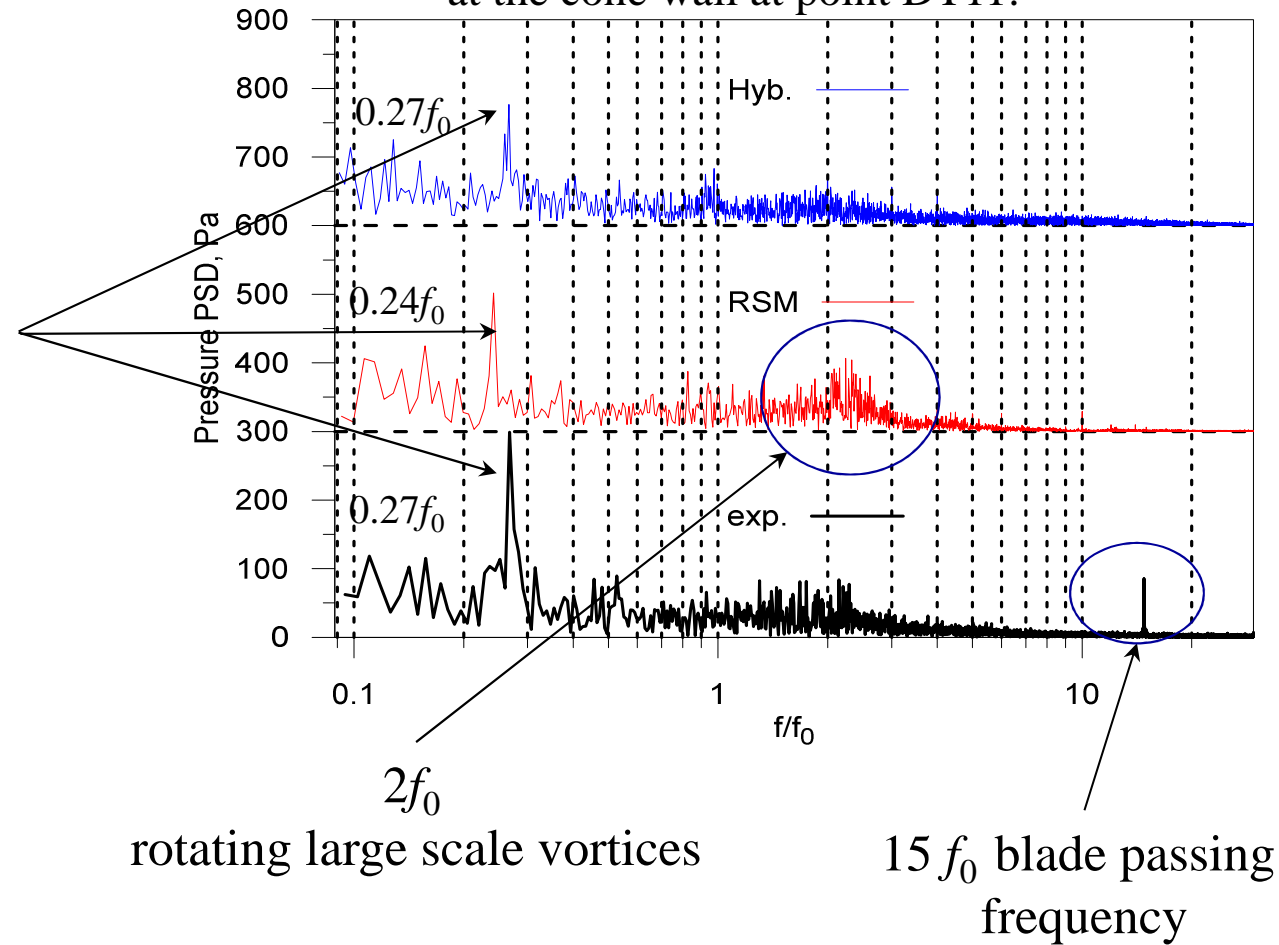


Instantaneous pressure iso-surface (HYB)
and locations of the pressure sensors



**Precessing
vortex rope**

Power spectrum density of pressure signals
at the cone wall at point DT11:



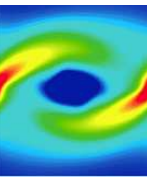
rotating large scale vortices

15 f_0 blade passing
frequency

Both HYB and RSM predict the same peak amplitude of ~ 200 Pa,
which is lower than the experimental 300 Pa.

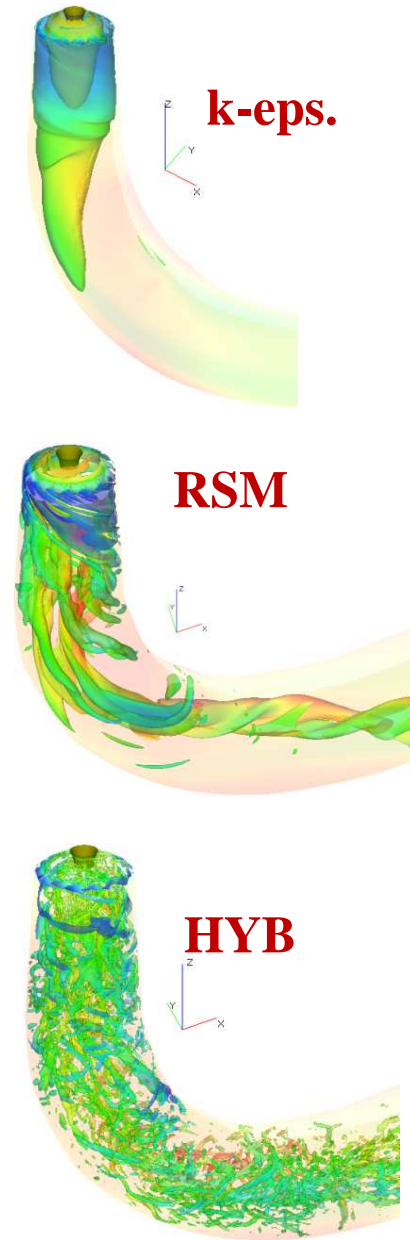
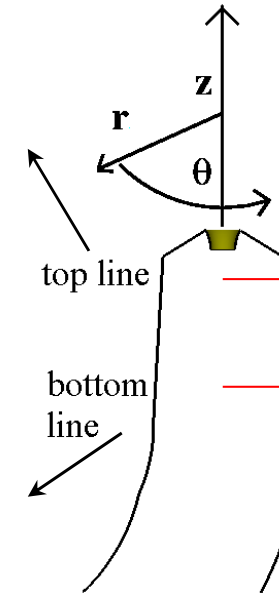
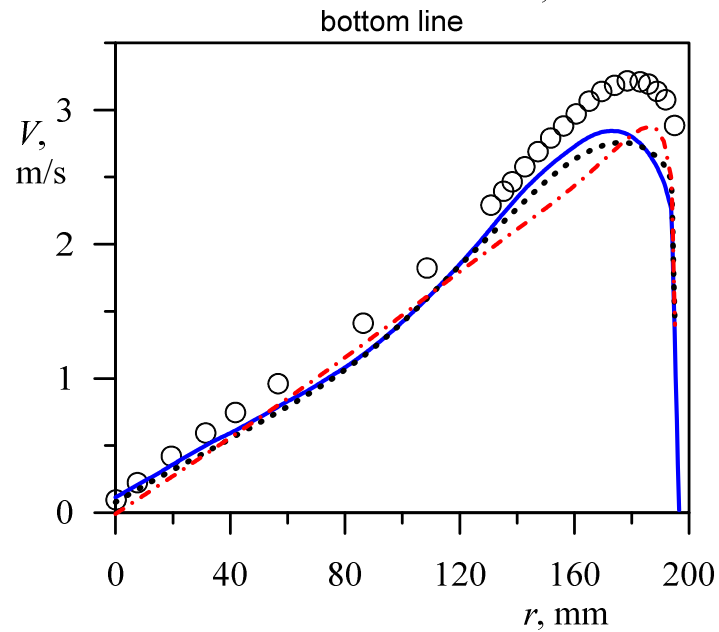
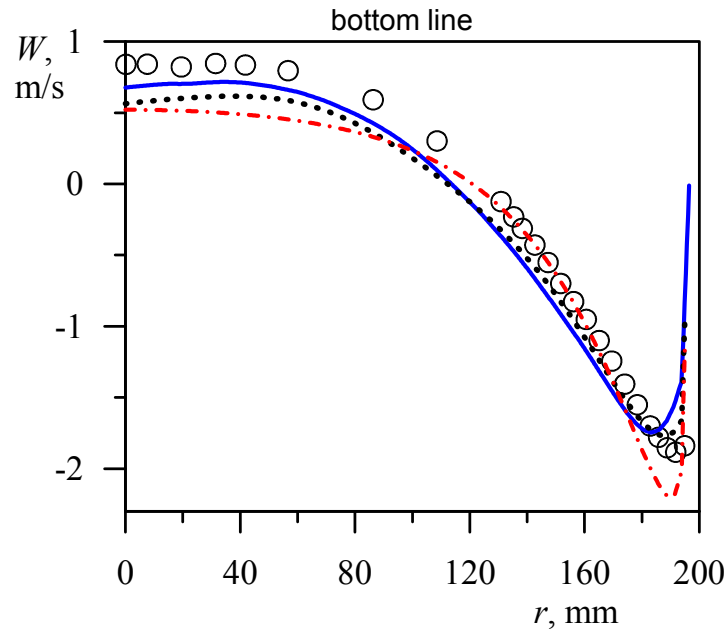
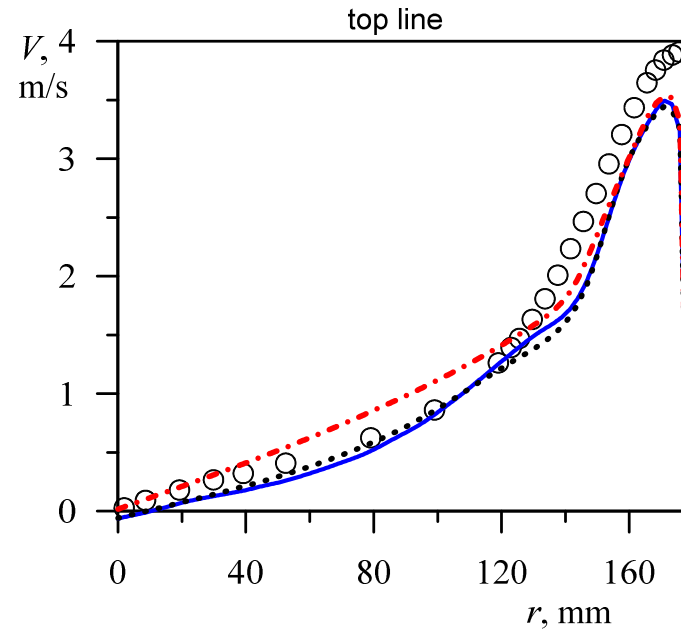
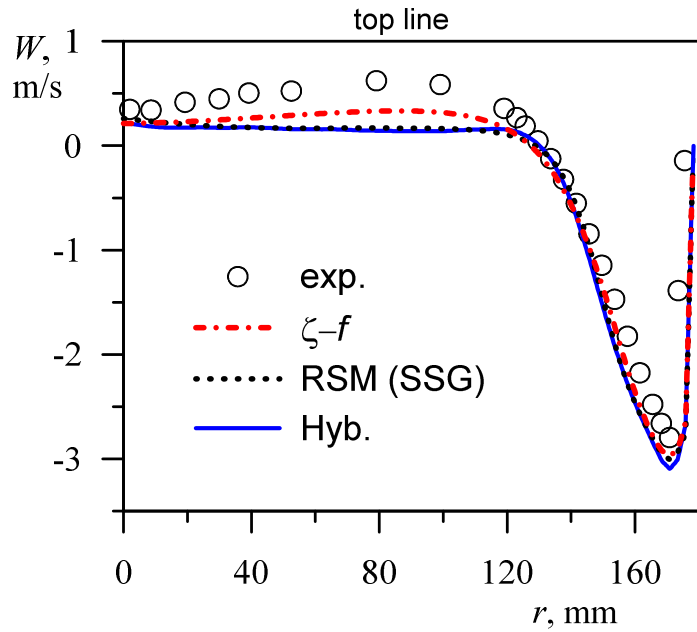


Mean velocity. Radial distributions



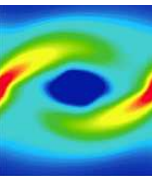
axial velocity

tangential velocity



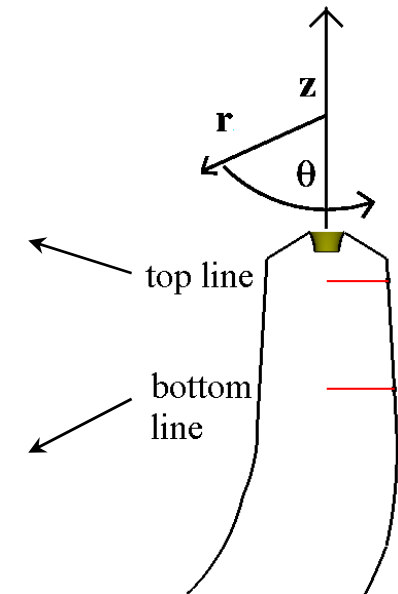
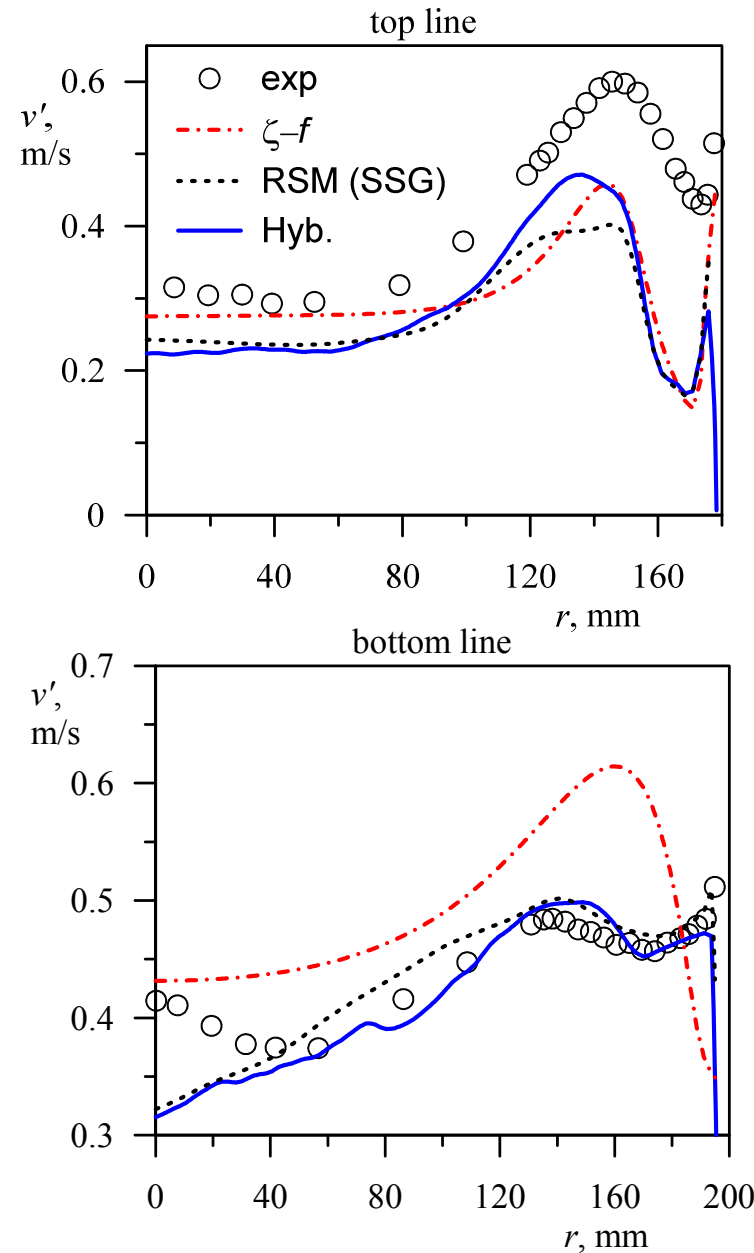
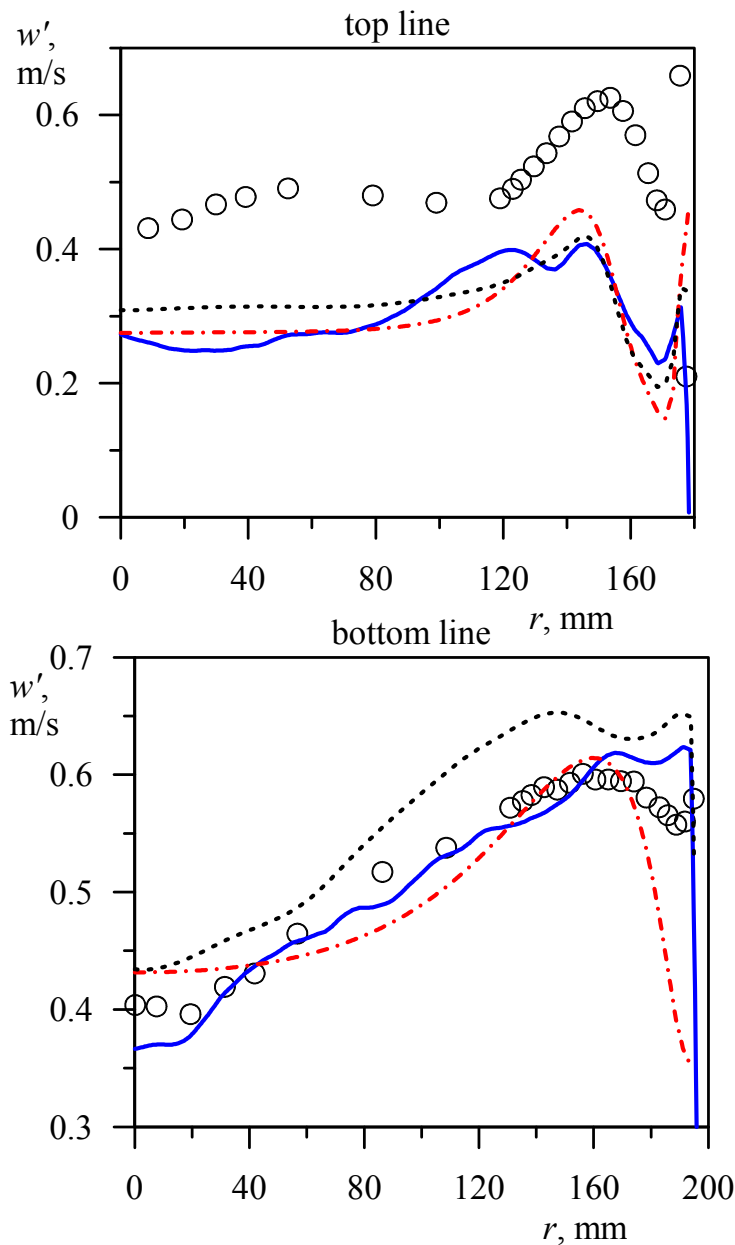


Velocity fluctuations. Radial distributions



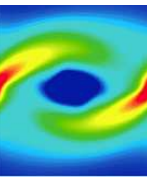
tangential velocity

axial velocity

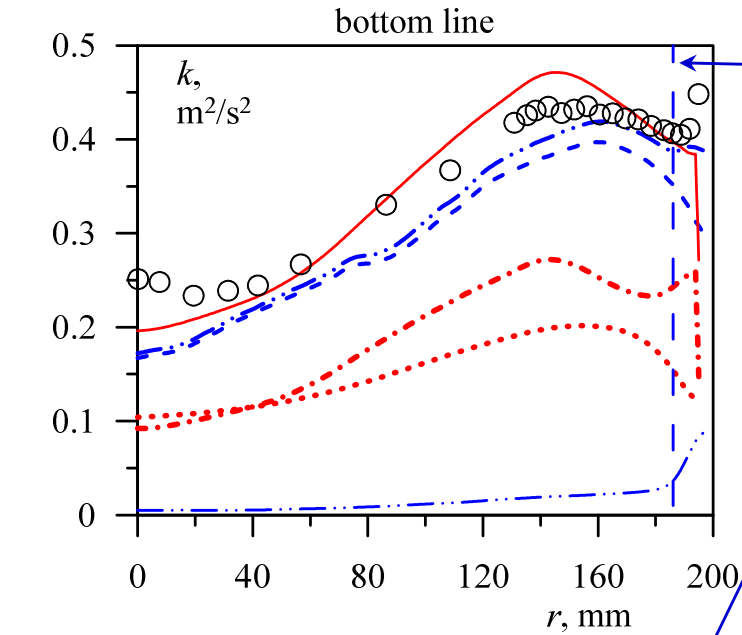
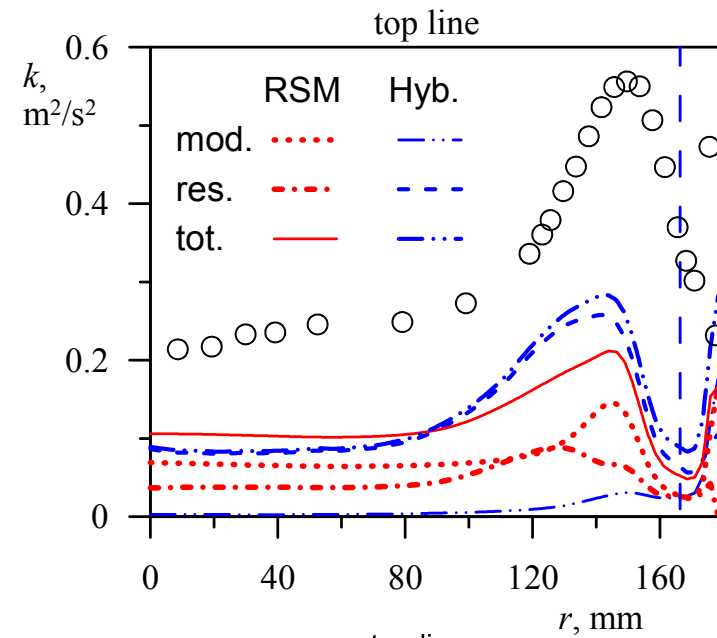




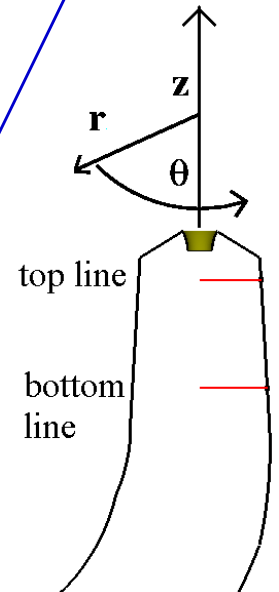
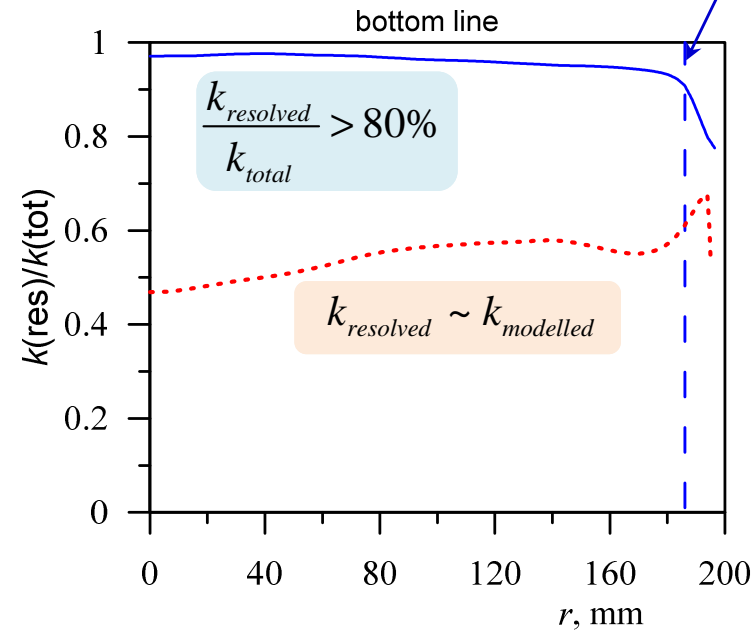
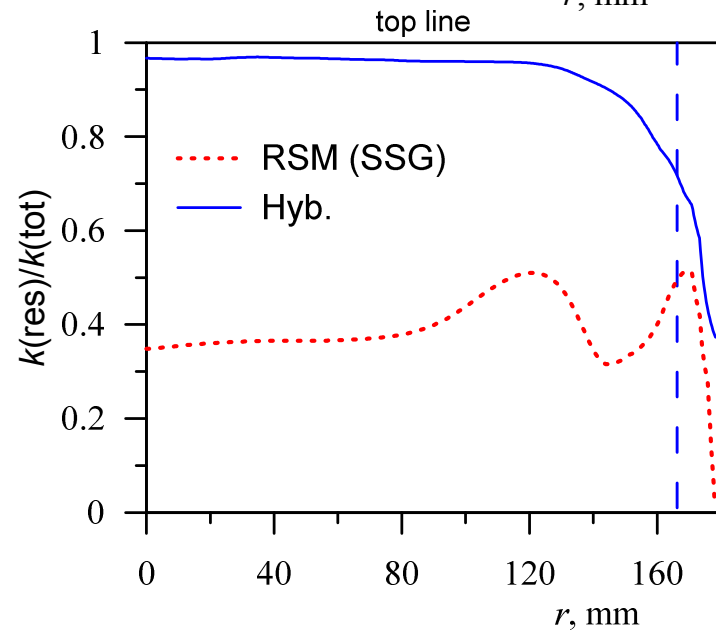
Turbulent kinetic energy. Radial distributions



experimental $k \approx 0.75(w^2 + v^2)$

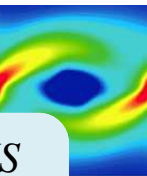


RANS/LES interface

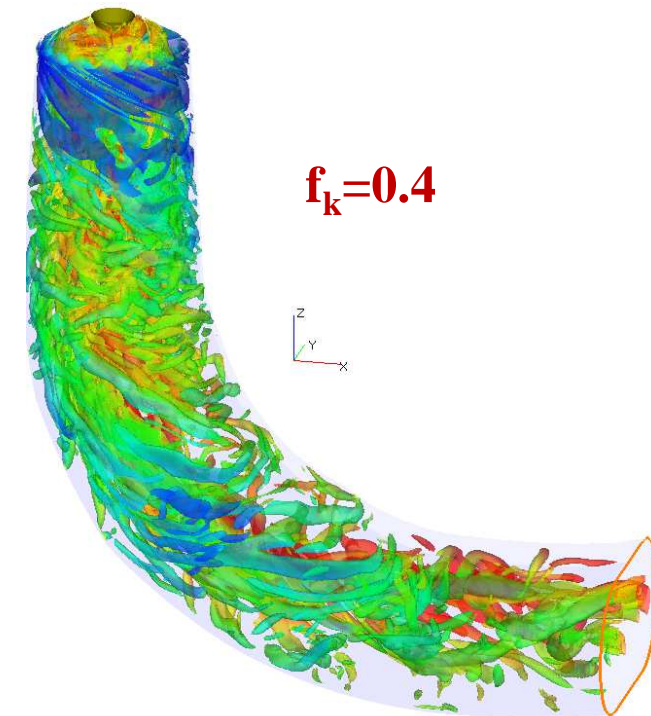
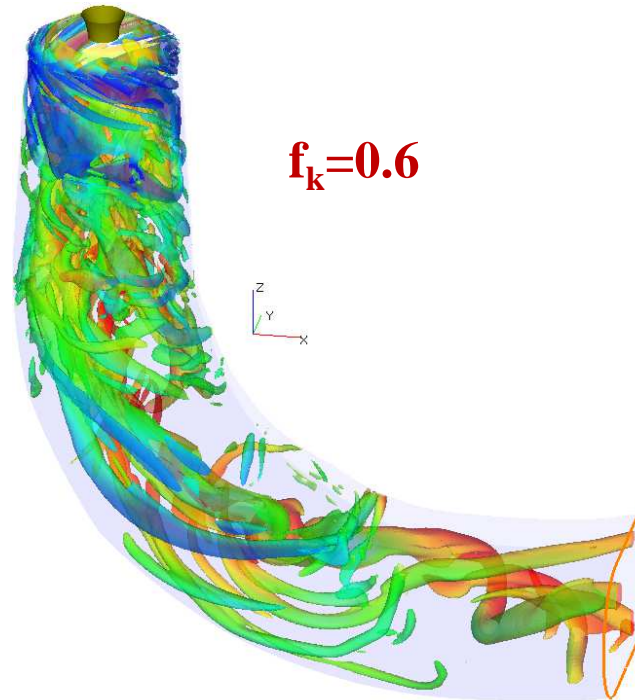
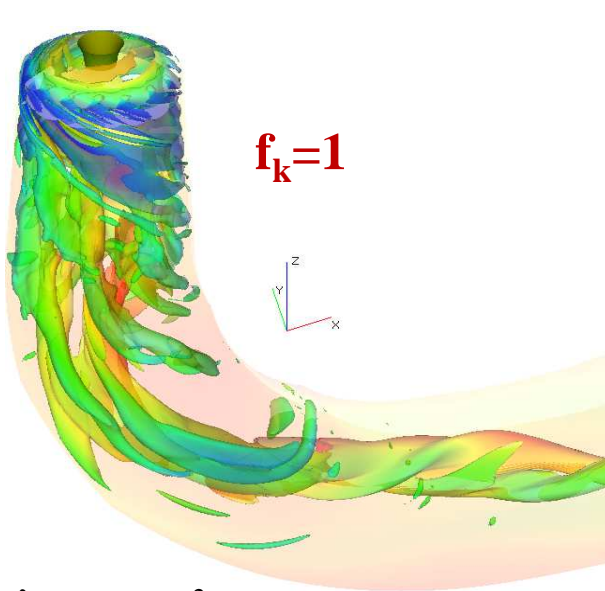




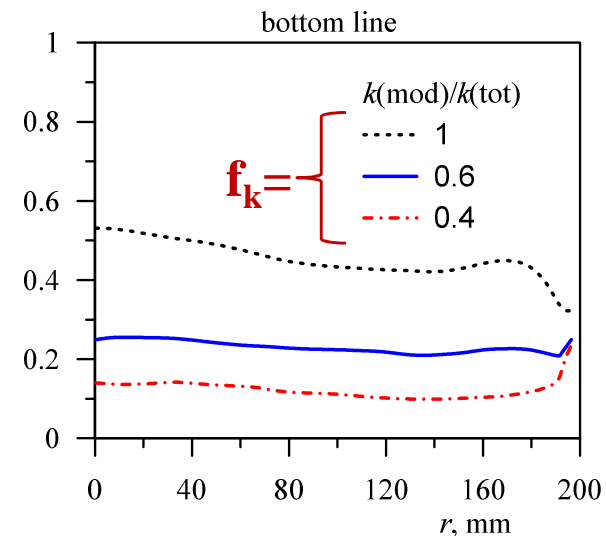
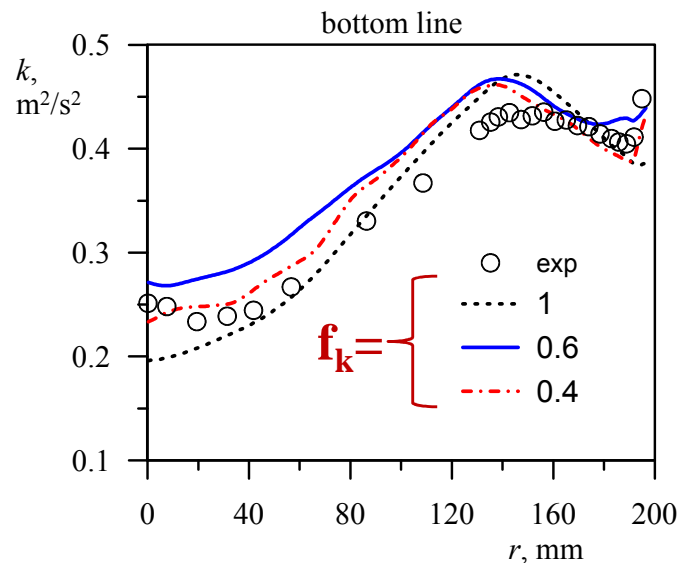
PANS RSM model in a zonal hybrid RANS/LES formulation



$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon u}} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho \frac{C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2}^* \varepsilon}{T} \quad C_{\varepsilon 2}^* = C_{\varepsilon 1} + f_k (C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}) \quad f_k = \frac{k_{mod}}{k_{tot}} = const \quad \begin{matrix} f_k = 1, & RANS \\ f_k = 0, & DNS \end{matrix}$$



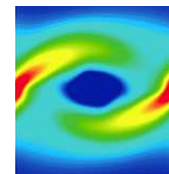
$\lambda_2 = -400 \text{ s}^{-2}$
colored by axial velocity



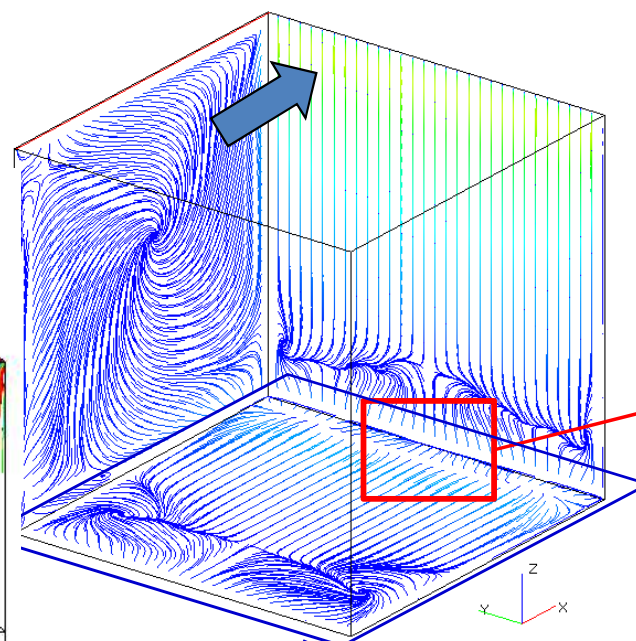
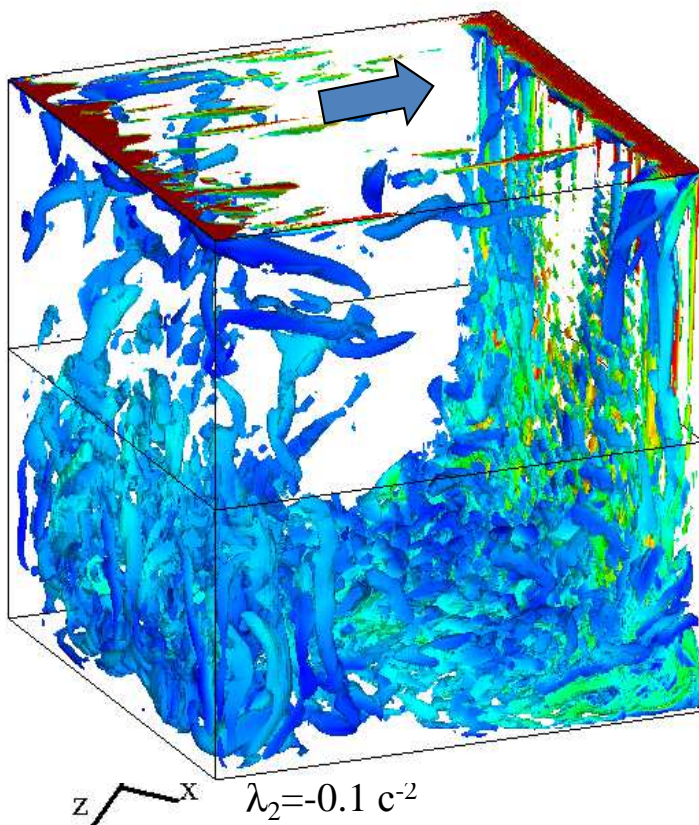


RANS и LES моделирование течения в каверне с движущейся крышкой

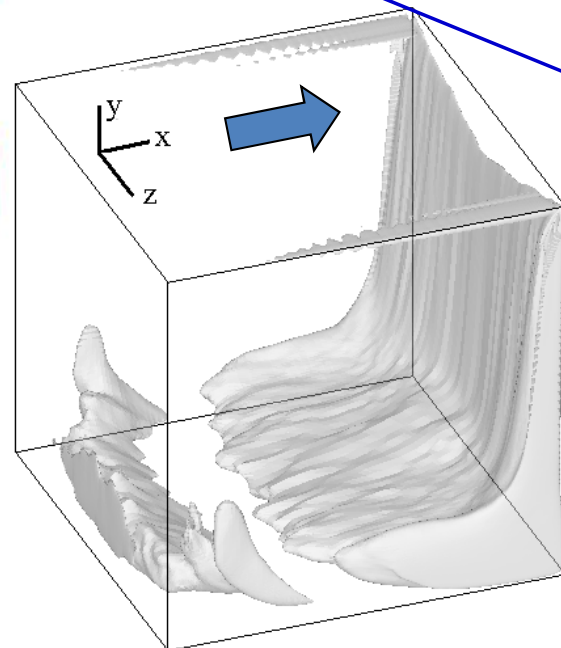
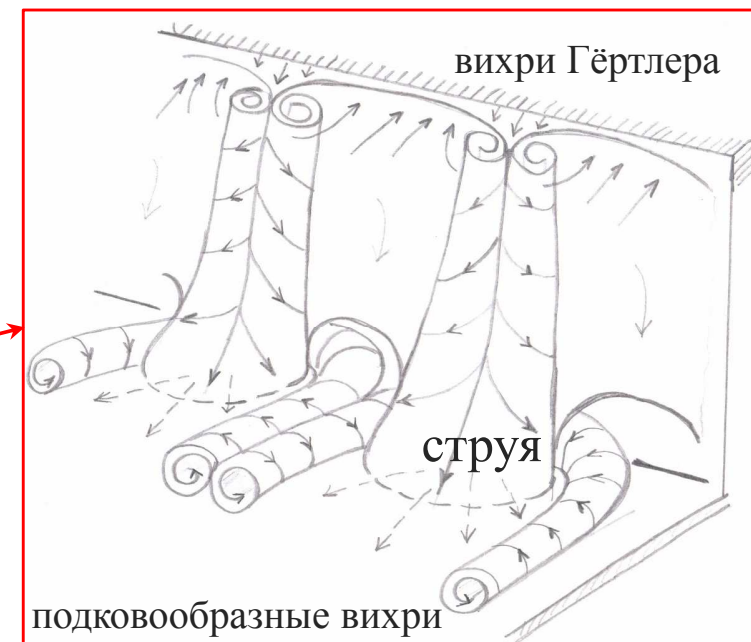
$$Re = U_0 h / \nu = 50 \times 10^3$$



Структуры осредненного течения

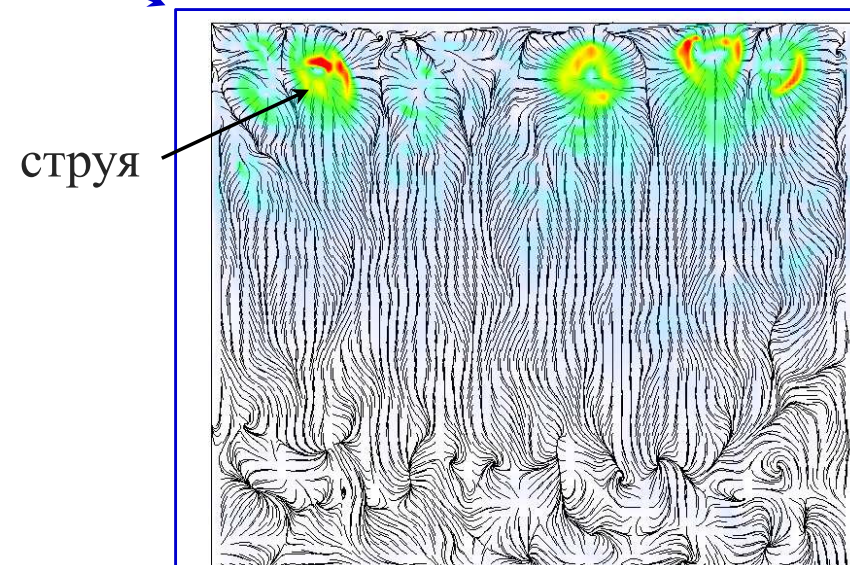


Структуры мгновенного течения



кинетическая энергия
 $k = 0.001 U^2$ турбулентных пульсаций

траектории частиц вблизи
нижней стенки и вязкие напряжения



Dynamic LES

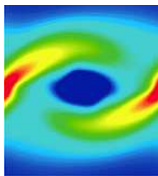
сетка – 4 млн. ячеек
осреднение – 1000 T

...



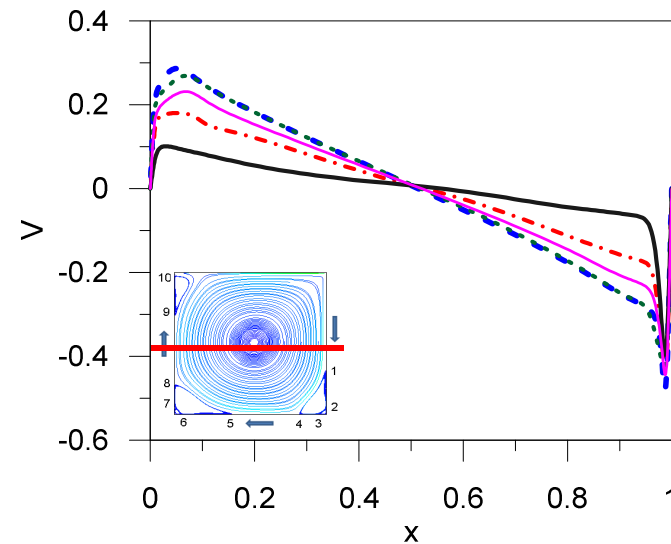
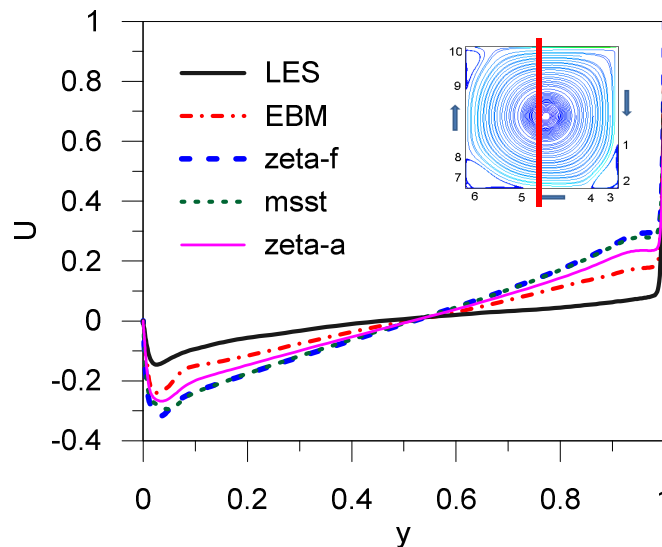
2D RANS моделирование течения в каверне с движущейся крышкой

$$\text{Re} = U_0 h / \nu = 50 \times 10^3$$

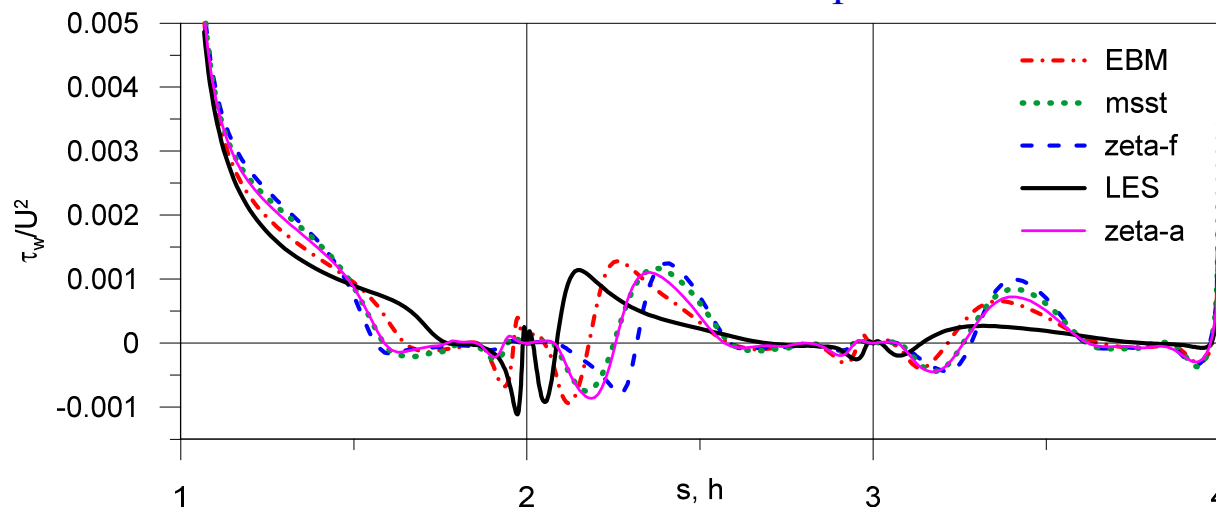
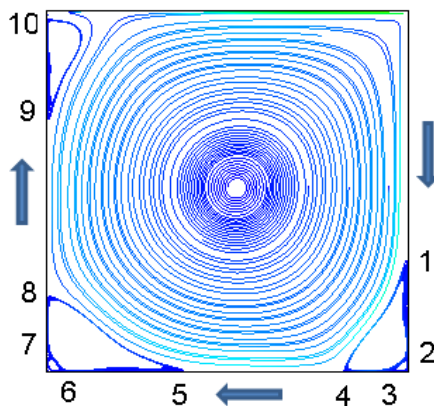


- модель переноса рейнольдсовых напряжений с эллиптическим смешиванием (EBM),
- k-ε модель с эллиптической релаксацией (zeta-f),
- k-ε модель с эллиптическим смешиванием (zeta-a),
- двухслойная k-ω SST модель Ментера (msst)

Средняя скорость



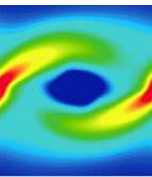
Вязкие напряжения на стенке



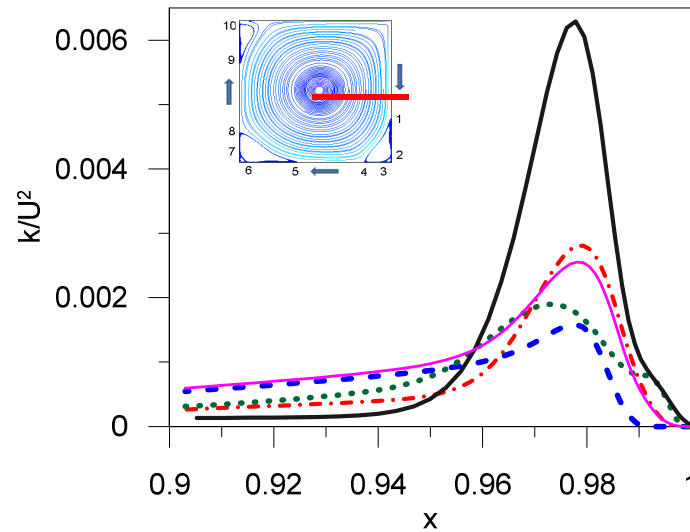
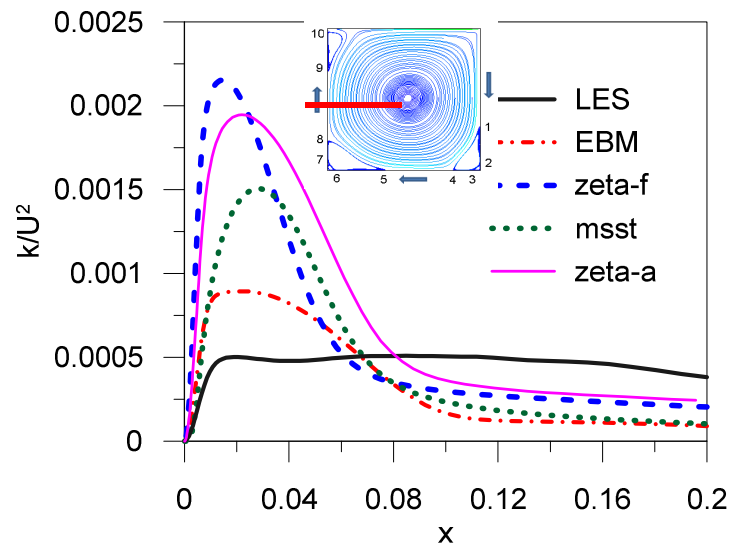
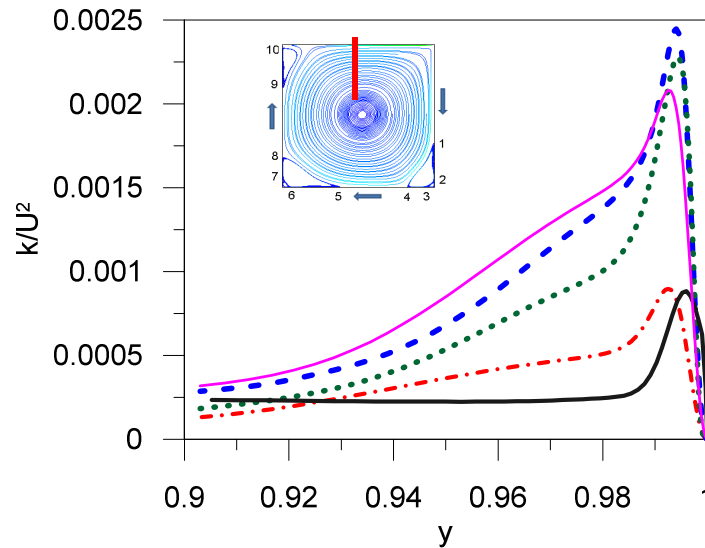
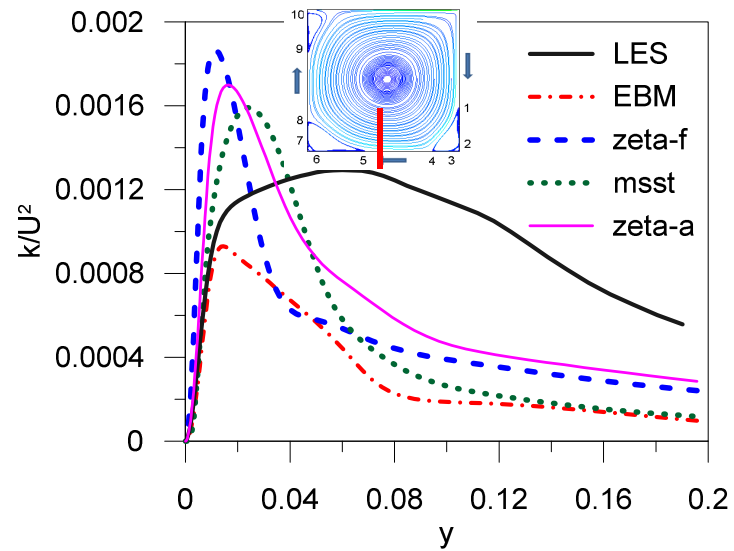


RANS моделирование течения в каверне с движущейся крышкой

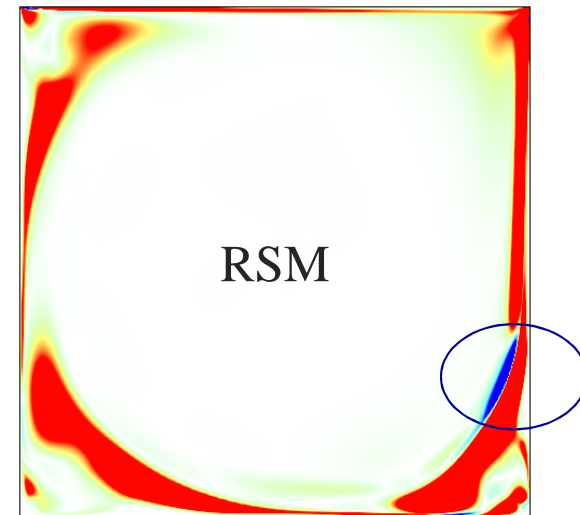
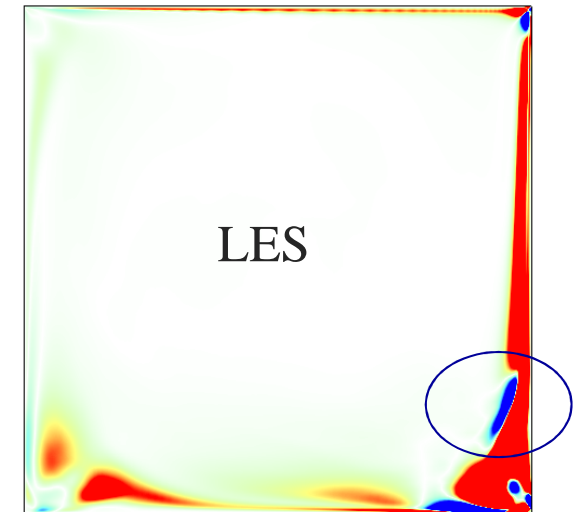
$$Re = U_0 h / \nu = 50 \times 10^3$$



Кинетическая энергия турбулентных пульсаций

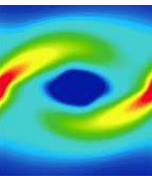


Генерация турбулентности





Моделирование движения частиц в турбулентном потоке



Траекторное моделирование динамики невзаимодействующих частиц

$$\frac{d\mathbf{r}_p(t)}{dt} = \mathbf{u}_p(t) \quad \frac{d\mathbf{u}_p(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p(t)) + \frac{\mathbf{f}}{m_p} \quad \tau_p = \frac{d_p^2 \rho_p}{18 \mu_f f_{drag}}$$

скорость несущей среды: $\mathbf{u}_f = \langle \mathbf{u}_f \rangle + \mathbf{u}'_f$

Стохастическое уравнение типа Ланжевена на нормализованную скорость

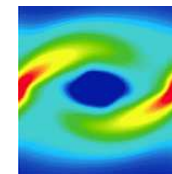
(Сиковский Д., ИТ СО РАН): $\mathbf{u}'_f = a\mathbf{U} \quad aa^T = \langle \mathbf{u}' \mathbf{u}' \rangle$

$$d\mathbf{U} = \left(\text{div} (f a^T) - \frac{1}{T_{Lp}} g \mathbf{U} \right) dt + \sqrt{\frac{2}{T_{Lp}}} b d\mathbf{W}$$

распараллеливание кода!



Моделирование движения частиц в турбулентном потоке



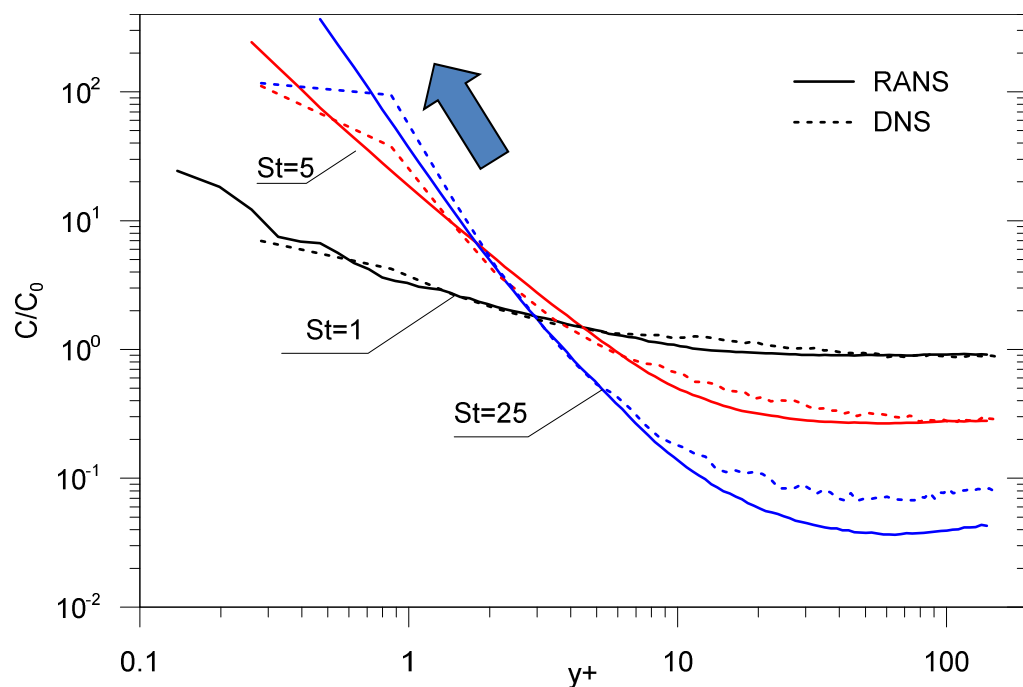
Установившееся течение в плоском канале, число $Re = 2105$, $Re_\tau = 150$.

Модель контакта частицы со стенкой – упругое отражение.

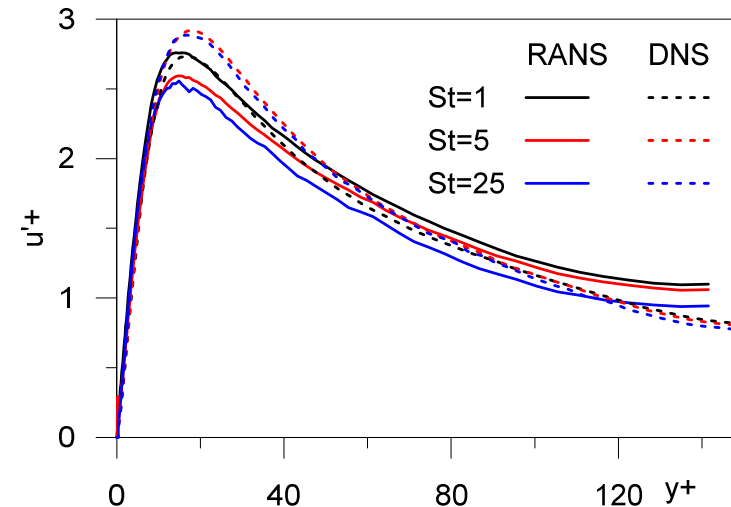
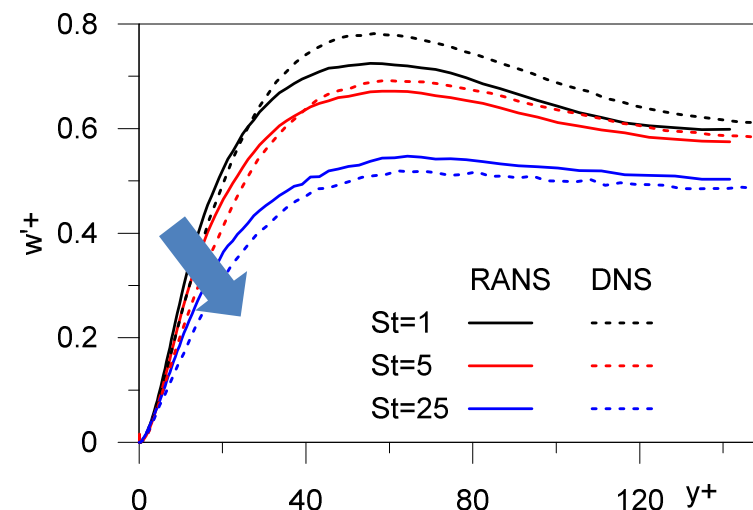
Модель турбулентности – RSM (EBM)

число Стокса частицы $St = \tau_p / t_\tau$

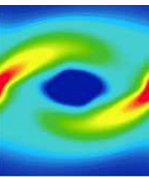
Нормированная концентрация



Пульсации скорости частиц



DNS - (Marchioli et al., 2008)



1. Двухжидкостная/двухкомпонентная модель плотной дисперсной среды
2. Гибридные RANS/LES модели
3. Сопряженный и радиационный теплообмен