

Код CABARET-STAGES.
Течение ЖМТ в круглой трубе

В.Ю. Готов

А.В. Соловьев

В.М. Головизнин

Код CABARET-STAGES

- 1. Код CABARET-Stages представляет собой реализацию методики КАБАРЕ для проведения массивных параллельных вычислений на кластерных ЭВМ задач гидродинамики на неструктурированных гексагональных сетках*
- 2. Реализованы несколько сцен (stages) для различных физических моделей (слабосжимаемая жидкость, идеальный газ, смесь идеальных газов, многокомпонентная слабосжимаемая среда)*
- 3. Реализован на языке C++*
- 4. Программная платформа использует библиотеку сеточных баз данных – ITAPS MOAB (A Mesh-Oriented datABase). Библиотека MOAB поддерживает все необходимые базовые операции для распределенных сеточных данных, позволяет работать как со структурированными, так и неструктурированными сетками, поддерживает все виды ячеек, включая произвольные многоугольники и многогранники.*
- 5. Формат хранения данных – HDF5 (Иерархический формат данных). Позволяет работать с данными большого размера. Обеспечивает высокую скорость доступа к данным.*
- 6. Реализована возможность асинхронной передачи сообщений (без блокировки) с использованием процедуры MPI_Isend*
- 7. Реализована возможность проведения расчетов с асинхронными шагами по времени. Разбиение на партии в этом случае проводится с учетом вычислительной сложности ячеек сетки*

Вычислительная эффективность кода

Lomonosov 2
 1024 nodes / 14336 (14) processors
 64 ГБ (4,5 ГБ/ядро)
 CPU: Intel Xeon E5-2697 v3 2.60GHz

Regular mesh weak scaling

Code: cabaret2

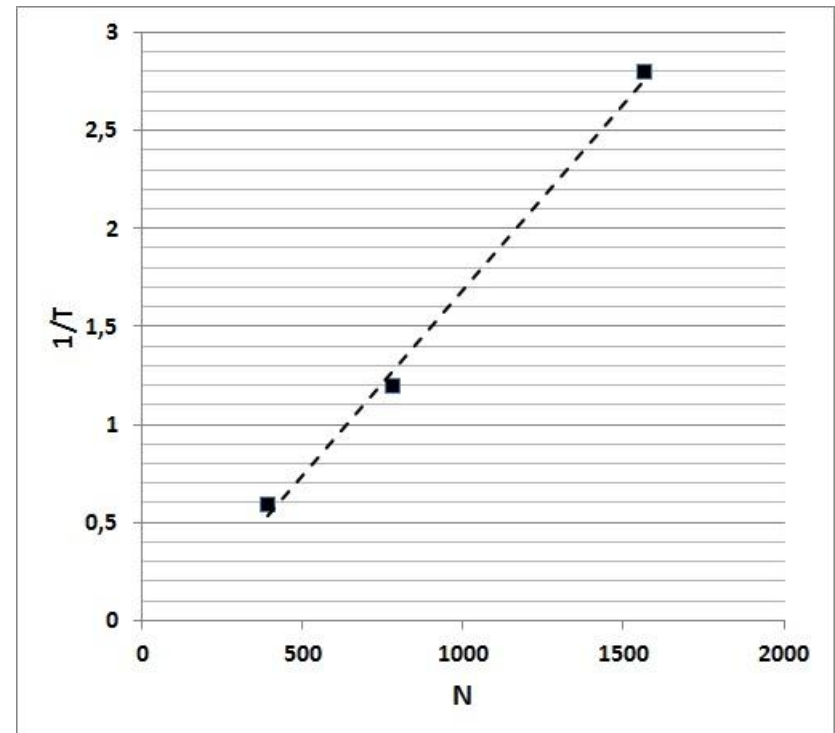
# of cells	# of processors	# cells per proc	Stats
343000 cells 70x70x70	392	880 / 1157 hexes per proc	t(real)=0.039291 N(step)=10 t=3.57143e-09 Z=4.059
686000 cells 140x70x70	784	883 / 1162 hexes per proc	t(real)=0.041087 N(step)=10 t=3.57143e-09 Z=4.23009
1372000 cells 140x140x70	1568	873 / 1152 hexes per proc	t(real)=0.038008 N(step)=10 t=3.57143e-09 Z=3.95793

Regular mesh strong scaling

Code: cabaret2

# of cells	# of processors	# cells per proc	Stats
1372000 cells 140x140x70	392	3484 / 4201 hexes per proc	t(real)=1.703594 N(step)=100 t=3.57143e-09 Z=4.84135
1372000 cells 140x140x70	784	1743 / 2198 hexes per proc	t(real)=0.837325 N(step)=100 t=3.57143e-09 Z=4.75637
1372000 cells 140x140x70	1568	873 / 1152 hexes per proc	t(real)=0.358254 N(step)=100 t=3.57143e-09 Z=4.06308

$$Z = \frac{t \cdot N_{proc}}{N_{step} \cdot N_{grid}} \approx 4..5 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$$



Неявное подсеточное моделирование (ILES/MILES)

*J.P. Boris (1992) : использование ошибок округления
схем дискретизаций в качестве неявной подсеточной
модели турбулентности (ILES/MILES)*

Монотонные конечно-объемные схемы высокой
разрешающей способности*:

FCT (Boris, 1976)

PPM (Collela, 1984)

TVD (Harten, 1983)

MUSCL (van Leer, 1976)

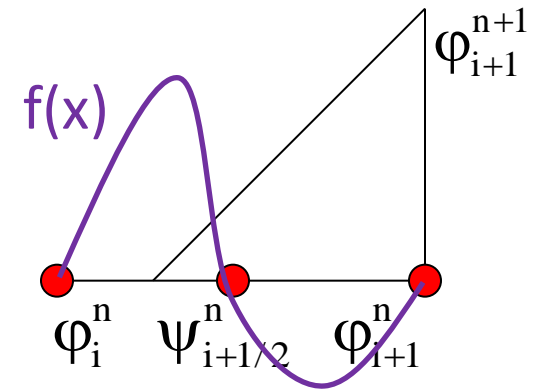
ENO/WENO (Shu, 1987)

КАБАРЕ (Головизнин, 1998)

*Преимущество перед классическим методом
вихревой вязкости*

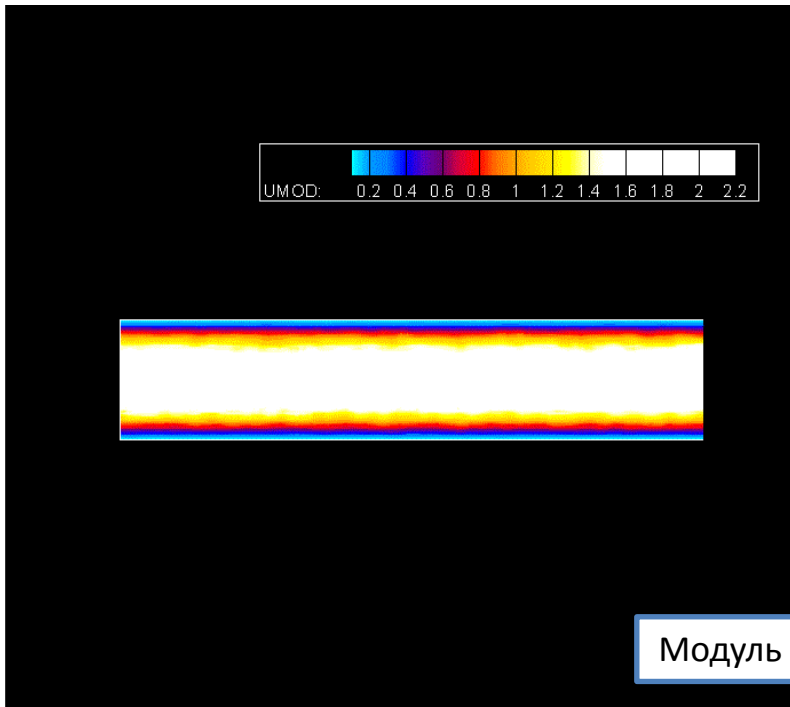
- 1. Отсутствие настроечных параметров →
большая универсальность*
- 2. Нет проблем со сходимостью и
устойчивостью численного метода*
- 3. Простота реализации*

**Grinstein, F.F., Margolin L.G., Rider W.J. Implicit Large Eddy Simulation. 2007: Cambridge University Press.*

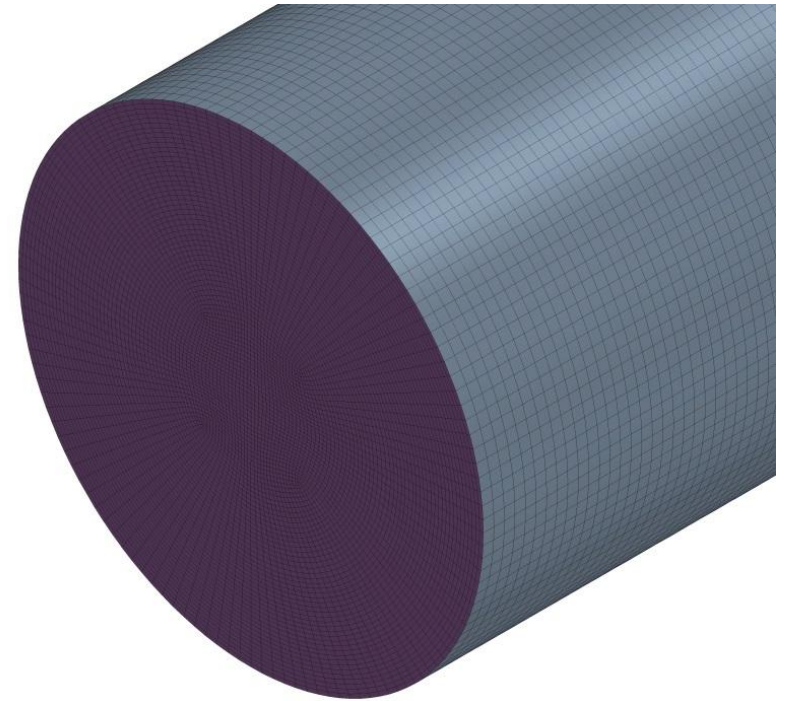


*Коррекция по принципу
максимума работает как
узкополосный фильтр,
удаляющий мелкомасштабные
пульсации*

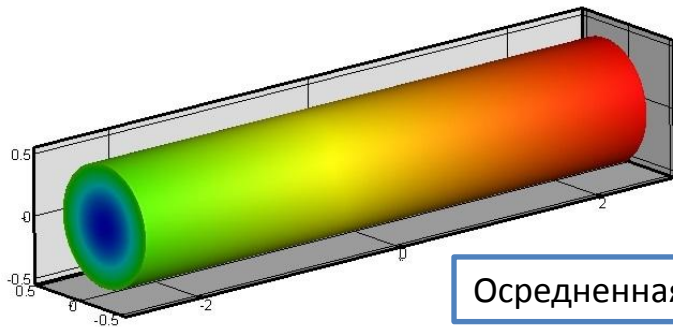
Постановка задачи



Модуль скорости



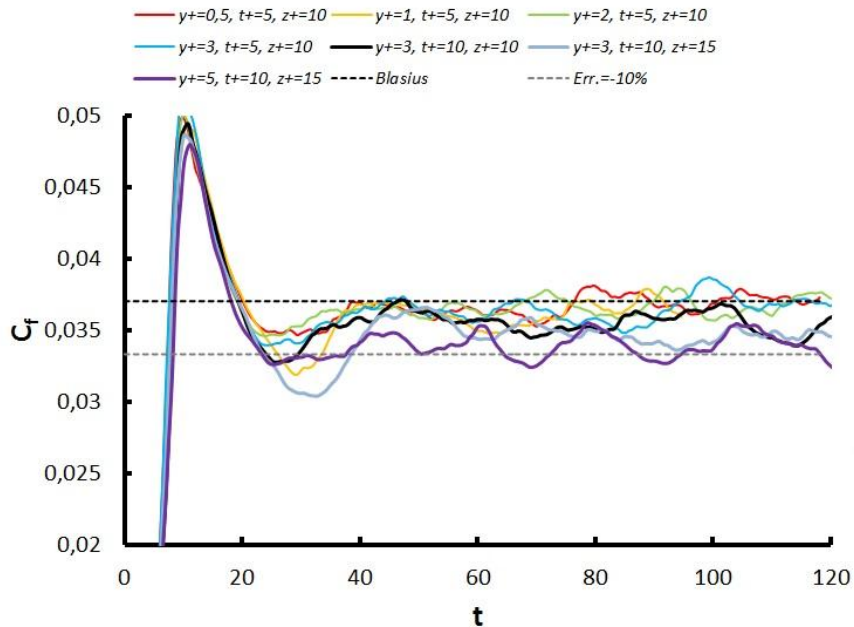
Фрагмент сеточной модели



Осредненная температура

На боковых поверхностях задаются условия прилипания и постоянный тепловой поток $q_w \approx 10^5 \text{ Вт/м}^2$. На торцах трубы ставятся периодические граничные условия с заданной среднemasсовой температурой на входе $T_b = 773 \text{ °K}$.

Исследование сходимости решения



КГС

Таблица 2. Сходимость результатов по схеме КАБАРЕ для $Re=5300$

Δr_{\min}^+	$\Delta R\theta_{\max}^+$	Δz^+	N_{cell}	$\varepsilon = (C_f - C_f^{\text{exp}}) / C_f^{\text{exp}} \cdot 100\%$
0,5	5,0	10,0	$6,7 \cdot 10^6$	-0,8
1,0	5,0	10,0	$5,9 \cdot 10^6$	-0,9
2,0	5,0	10,0	$4,8 \cdot 10^6$	-1,2
3,0	5,0	10,0	$4,4 \cdot 10^6$	-1,5
3,0	10,0	10,0	$1,3 \cdot 10^6$	-4,1
3,0	10,0	15,0	$0,9 \cdot 10^6$	-6,8
5,0	10,0	10,0	$1,2 \cdot 10^6$	-7,3
5,0	10,0	15,0	$0,8 \cdot 10^6$	-8,5

Параметры сеточной модели

Таблица 1. Параметры сеточной модели

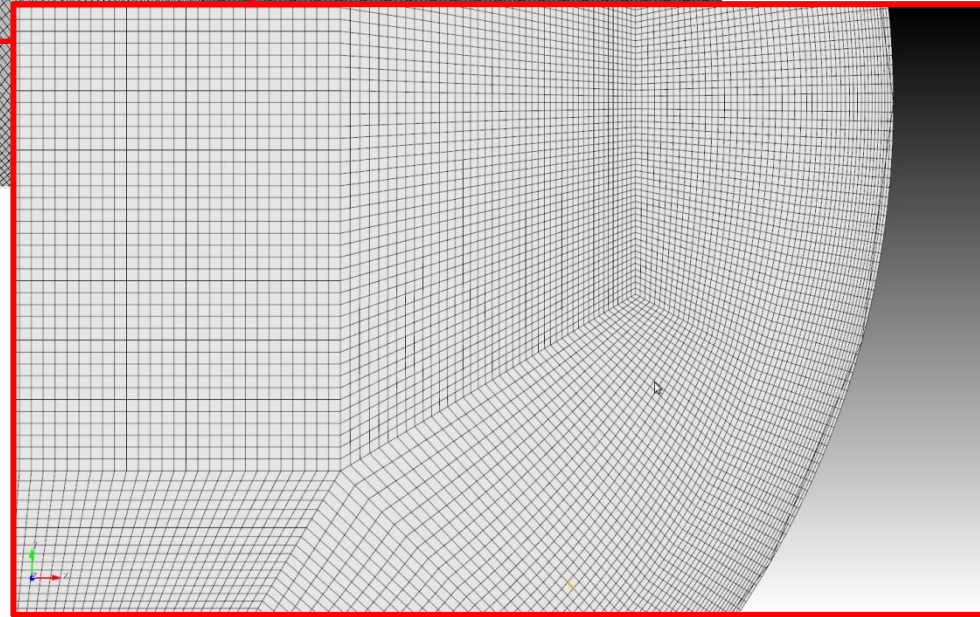
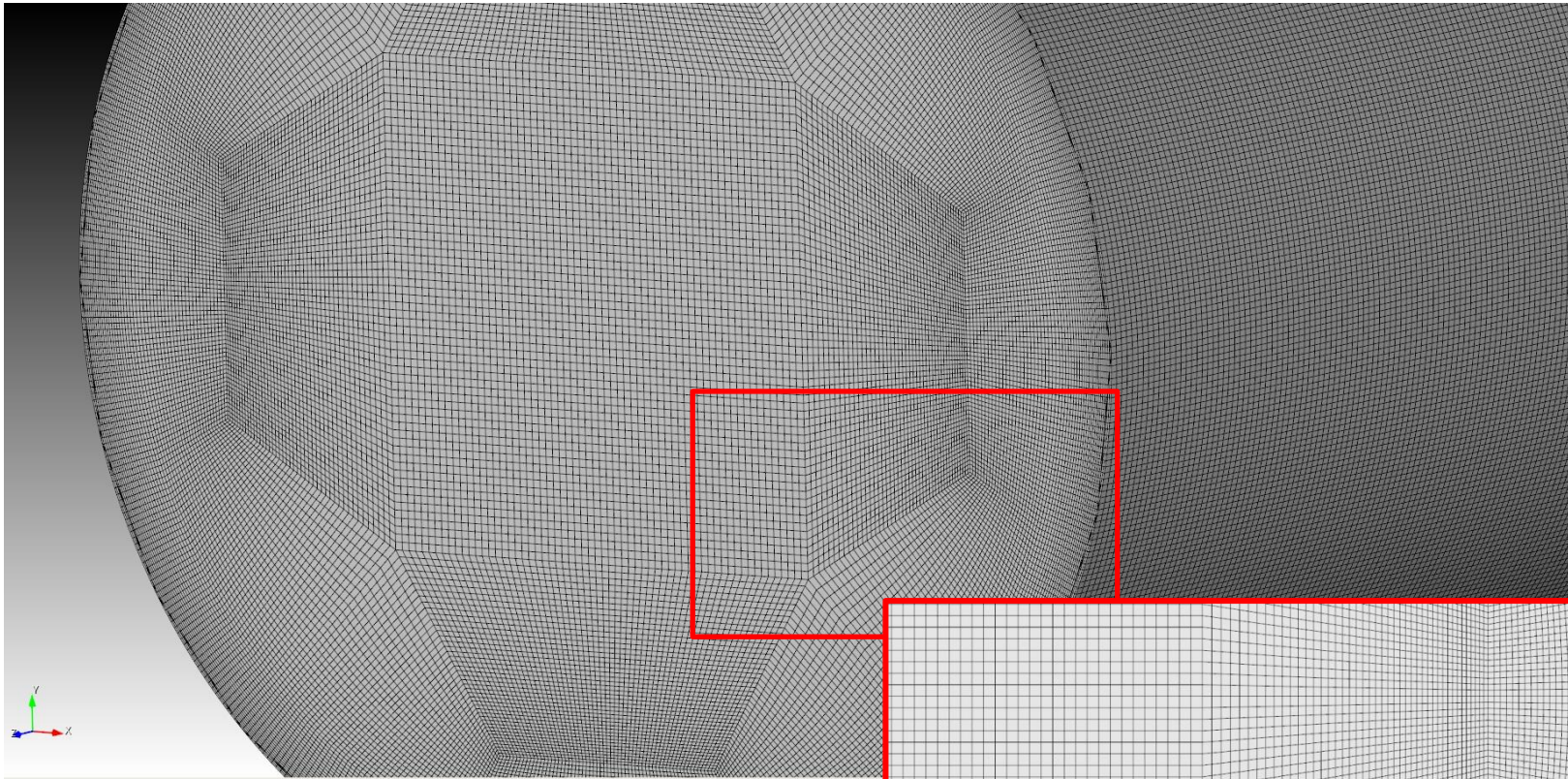
Re	L/R	N_{cell}	N_{φ}	N_z	Δr_{min}^+	$\Delta R\theta_{max}^+$	Δ_{center}^+	Δz^+
5300	20	2.98×10^6	128	440	3,0	8,8	3,1-3,5	8,1
11700	10	5.22×10^6	200	320	3,0	11,2	4,4-5,0	11,2
19000	10	19.52×10^6	320	500	3,0	10,8	4,4-5,0	11,0
37700	15	44.16×10^6	624	1000	3,0	10,1	12,9	15,0

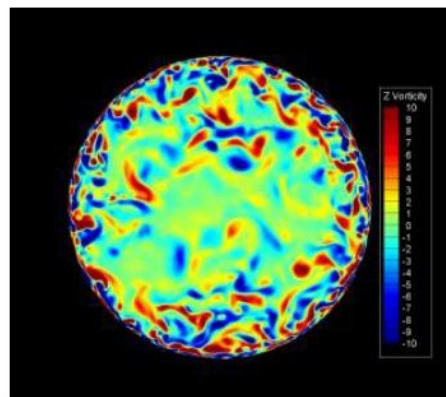
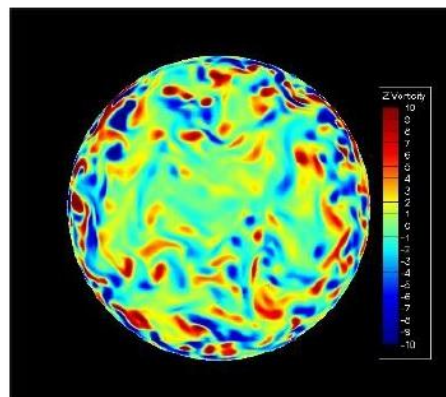
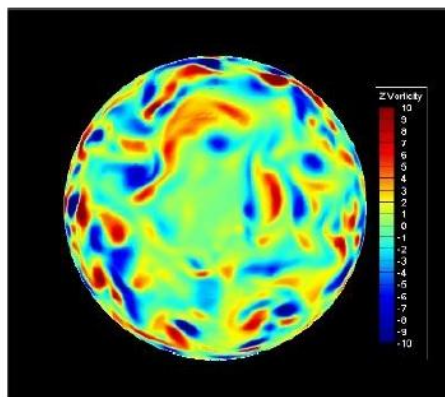
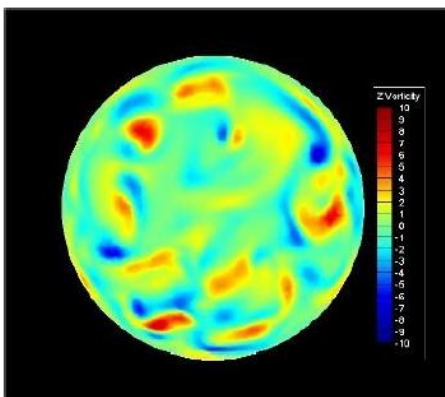
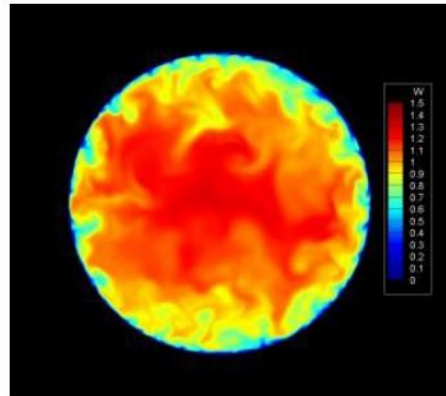
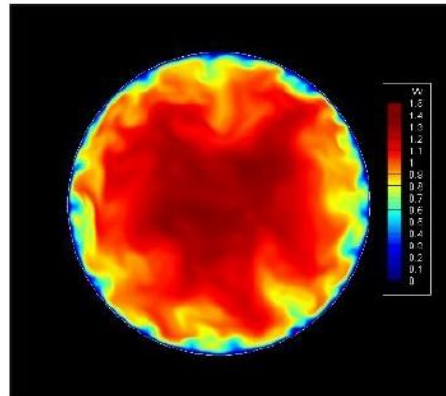
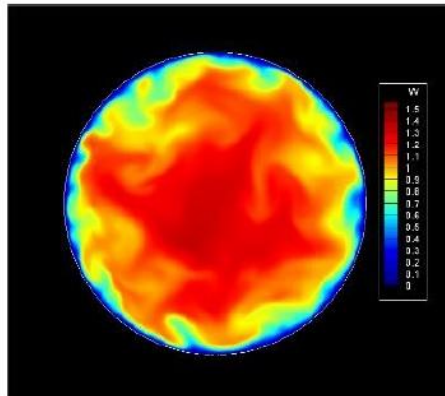
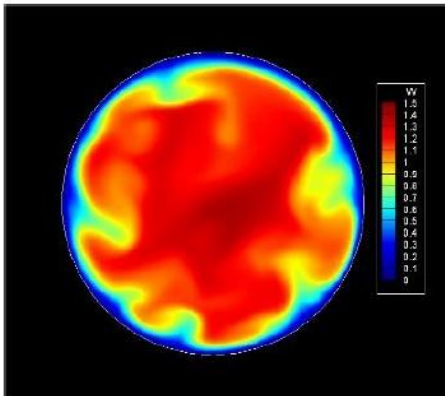
DNS, SEM, Nek5000, 2013

Table 1 Details on the present turbulent pipe flows simulations

Re_b	# of elements	# grid points	Δr^+	$\Delta R\theta^+$	Δz^+
5,300	36,480	18.67×10^6	(0.14, 4.44)	(1.51, 4.93)	(3.03, 9.91)
11,700	237,120	121.4×10^6	(0.16, 4.70)	(1.49, 4.93)	(3.03, 9.91)
19,000	853,632	437.0×10^6	(0.15, 4.49)	(1.45, 4.75)	(3.06, 9.99)
37,700	1,264,032	2.184×10^9	(0.15, 5.12)	(0.98, 4.87)	(2.01, 9.98)

Фрагмент сеточной модели ($Re=37700$)





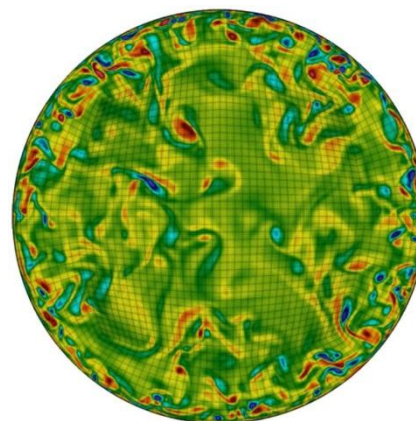
Re=5300

Re=11700

Re=19000

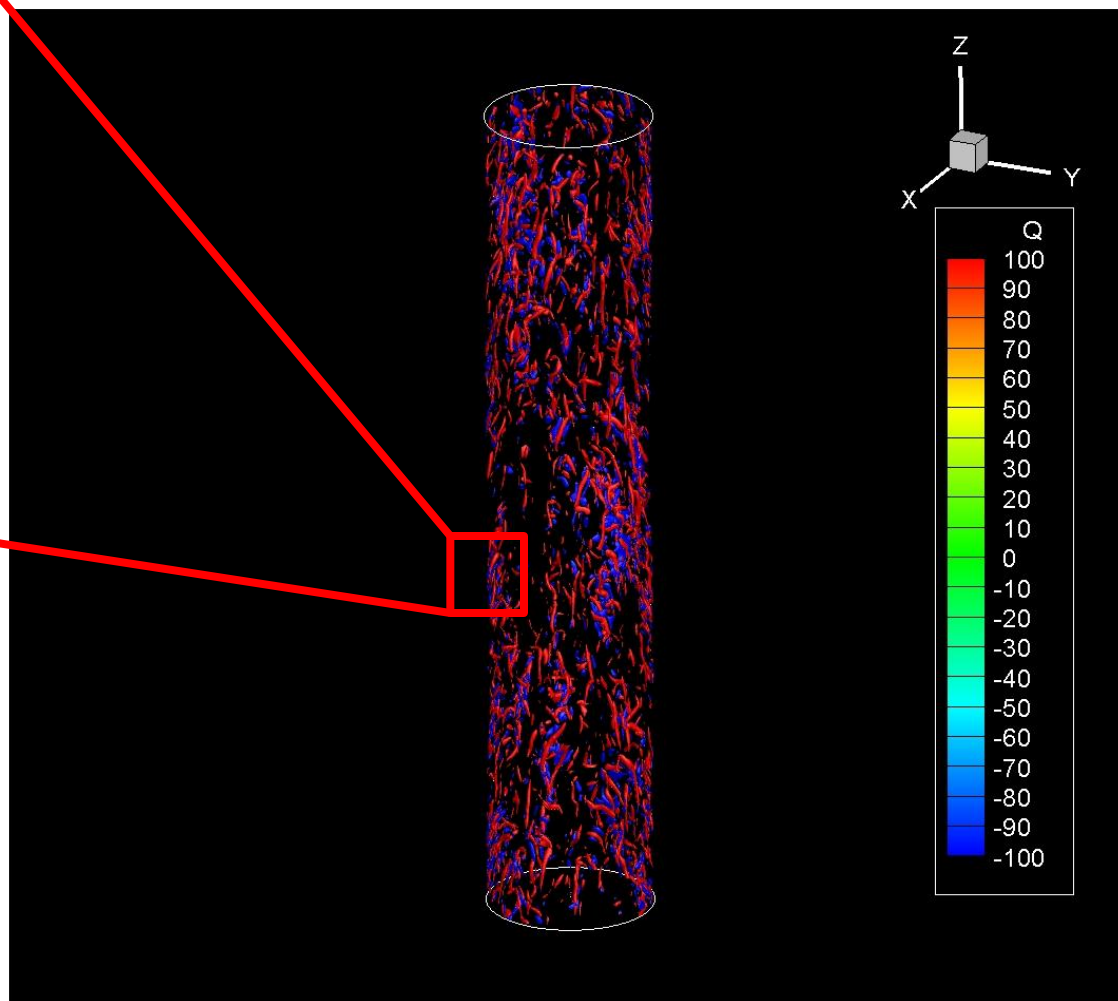
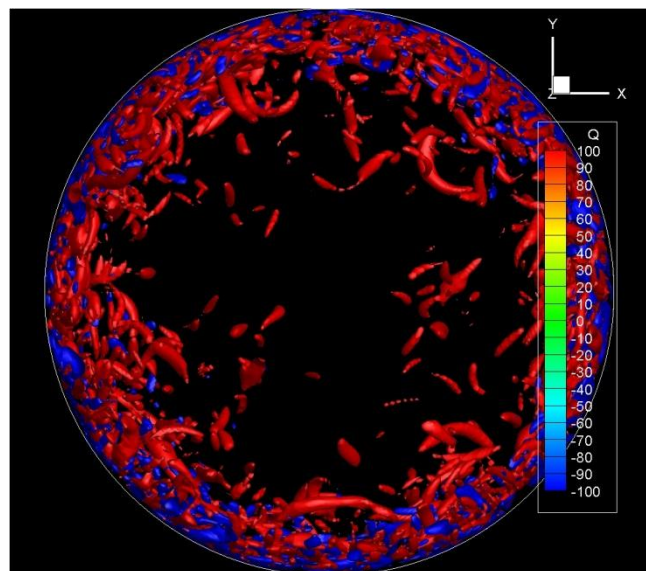
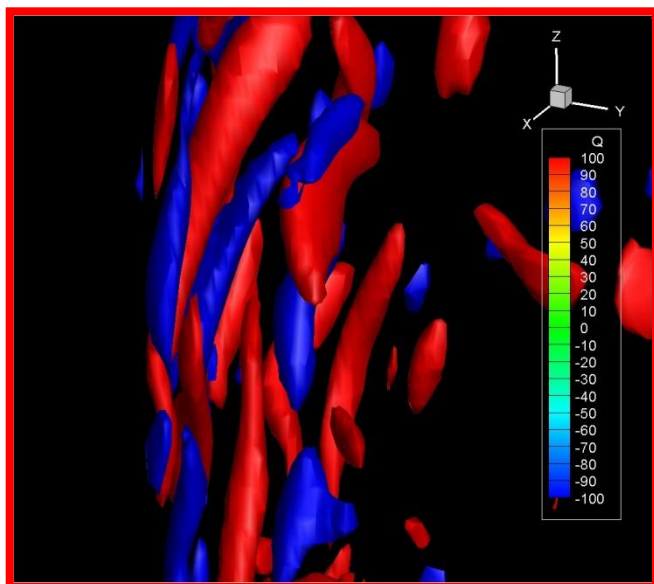
Re=37700

Поля скорости (сверху) и завихренности (снизу) в сечении XY



DNS, Re=19000

Q-критерий $Re=19000$



Кросс верификация с кодом Star-CCM+ (АО «НИКИЭТ»)

LES-приближение: схема MUSCL+WALE

на границах расчётной области использовался набор ассимптотических приближений - "обращение стенки", позволяющий проводить моделирование на сетках с $y^+ > 1$.

RANS-приближение: схема MUSCL+k-eps realizable

двухслойная модель - сшивается двухпараметрическая дифференциальная k-ε модель с однопараметрической, которая решает k в рамках дифференциального соотношения, а ε описывает в рамках алгебраического соотношения

Интегральные характеристики

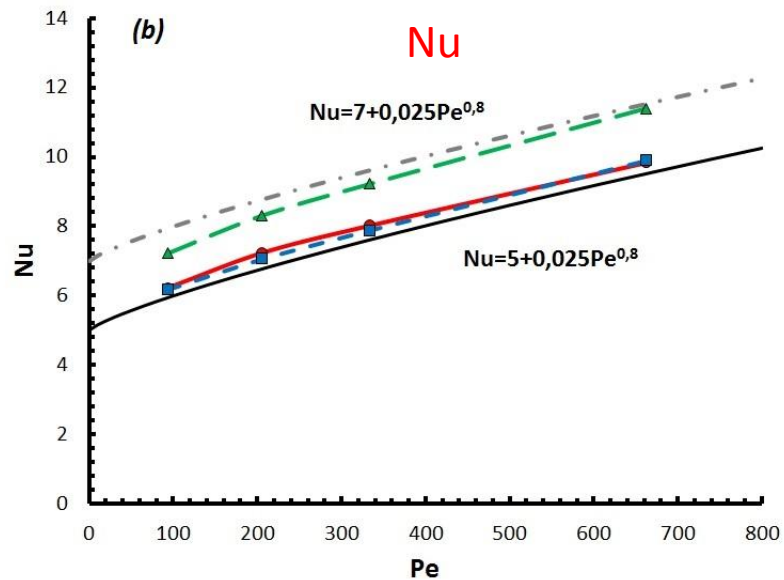
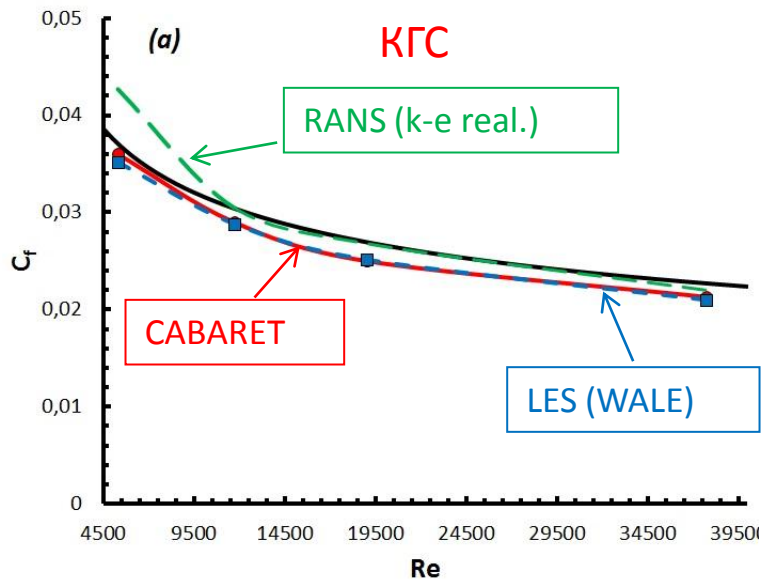


Таблица 2. Коэффициент гидродинамического сопротивления

Re	Формула Блазиуса	КАБАРЕ	LES (WALE)	RANS (k-e real.)
5300	0,0370	0,0355 (-4,0%)	0,0352 (-5,1%)	0,0427 (+15,4%)
11700	0,0304	0,0289 (-5,0%)	0,0288 (-5,2%)	0,0305 (+0,24%)
19000	0,0269	0,0250 (-7,1%)	0,0251 (-6,7%)	0,0268 (-0,3%)
37700	0,0227	0,0213 (-6,1%)	0,0210 (-7,5%)	0,0220 (-3,3%)

Таблица 3. Коэффициент теплоотдачи

Re	Формула Субботина	КАБАРЕ	LES (WALE)	RANS (k-e real.)
5300	5,94	6,22 (+4,8%)	6,18 (+4,0%)	7,22 (+21,5%)
11700	6,77	7,23 (+6,8%)	7,06 (+4,2%)	8,31 (+22,7%)
19000	7,61	8,02 (+5,4%)	7,89 (+3,7%)	9,22 (+21,1%)
37700	9,52	9,83 (+3,3%)	9,90 (+4,0%)	11,39 (+19,7%)

Профили скорости и температуры

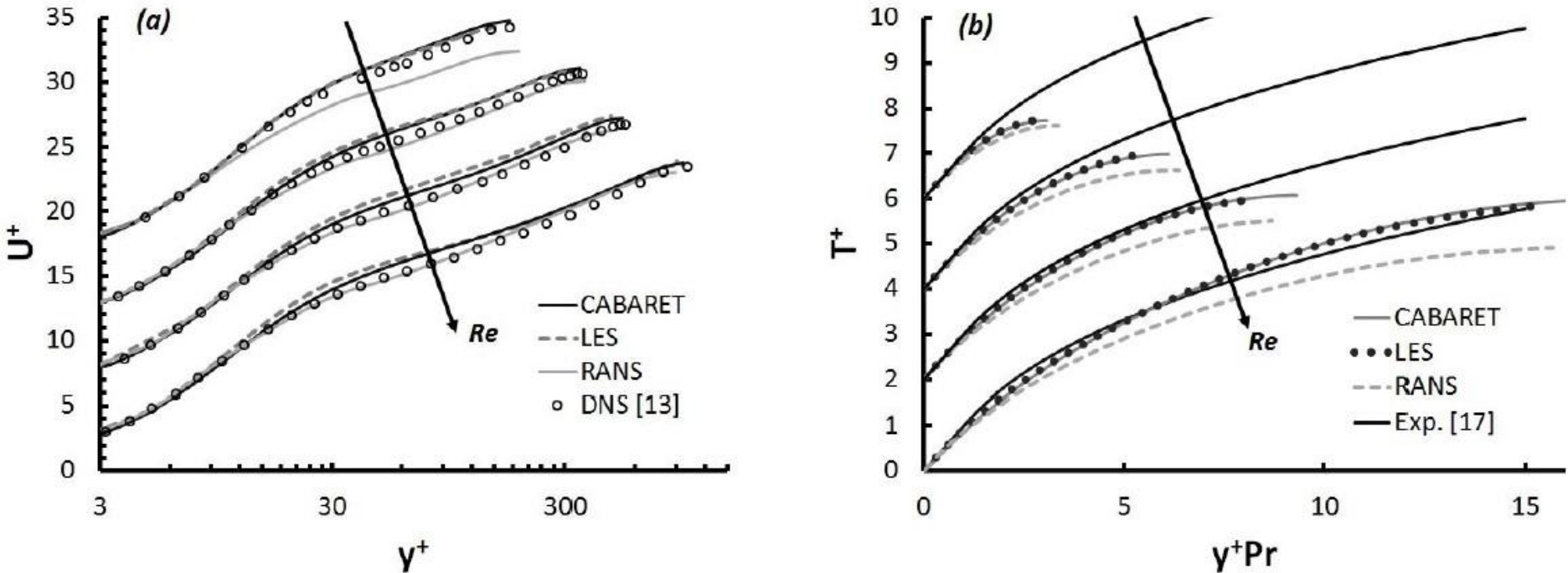


Рис. 4. *a* – профиль средней скорости; *b* – профиль средней температуры.

***DNS[13]**: Khoury, G.K.E. et al. Direct Numerical Simulation of Turbulent Pipe Flow at Moderately High Reynolds Numbers // Flow Turbulence Combust (2013), 2013. **91**: p. 475-495.

****Exp. [17]**: Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) 1990, Москва: Энергоатомиздат. 360 с.

Кинетическая энергия турбулентных пульсаций

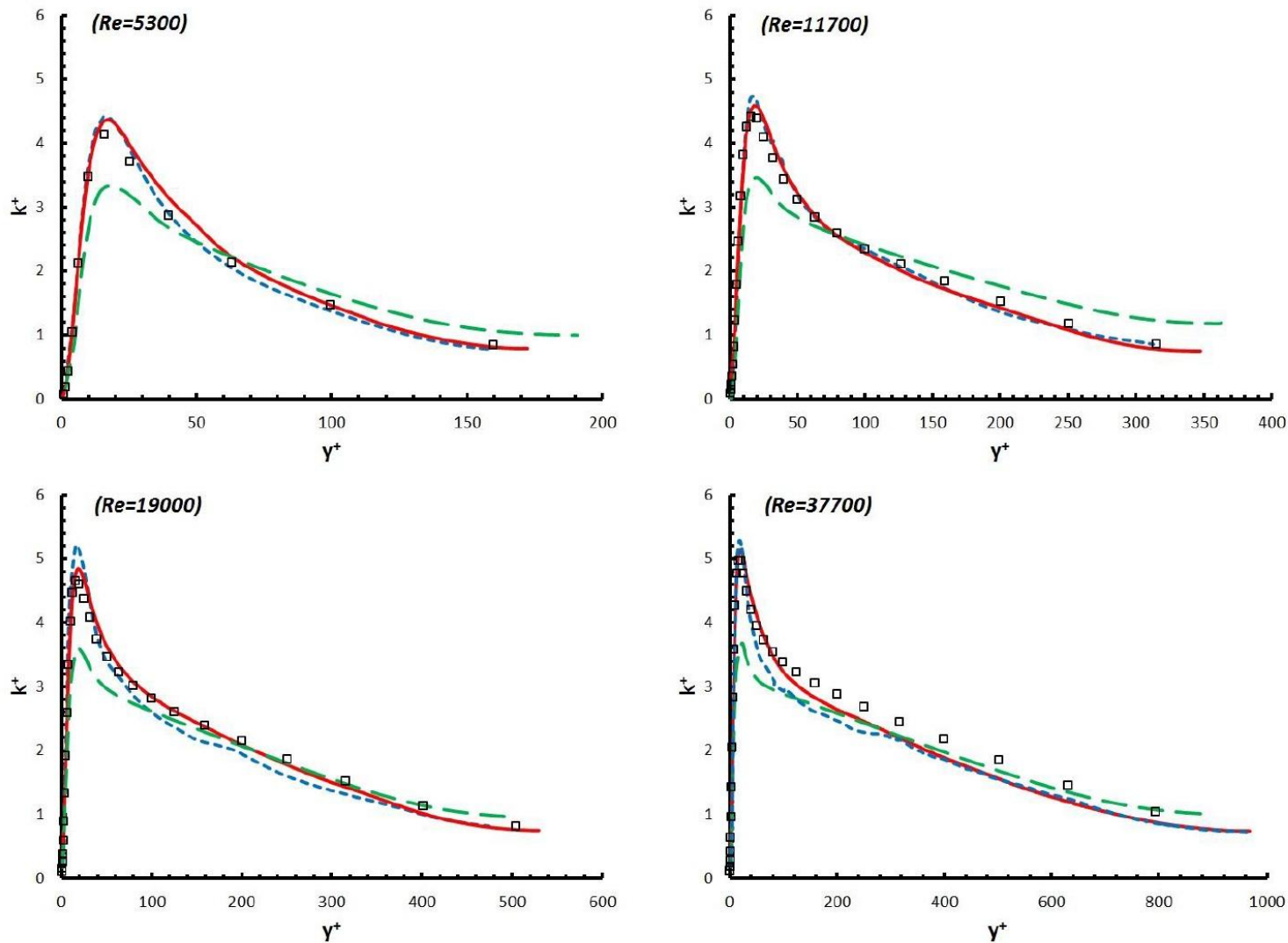


Рис. 4. Кинетическая энергия турбулентности (нормировка на u_τ^2).
□, DNS [10]; —, КАБАРЕ; ---, LES (WALE); - - -, RANS (k - ϵ real).

Скорость генерации и диссипации турб. кинетической энергии

генерация

диссипация

$$dk/dt = P^k + \varepsilon^k + \Pi^k + D^k + T^k$$

$$P^k = -\langle u_i' u_j' \rangle \partial \langle u_i \rangle / \partial x_j$$

$$\varepsilon^k = -\nu \cdot \langle \partial u_i' / \partial x_j \cdot \partial u_i' / \partial x_j \rangle$$

$$\Pi^k = -1/\rho \cdot \partial \langle p u_i' \rangle / \partial x_i$$

$$D^k = \nu/2 \cdot \partial^2 \langle u_i' u_i' \rangle / \partial x_j^2$$

$$T^k = -1/2 \cdot \partial \langle u_i' u_i' u_j' \rangle / \partial x_j$$

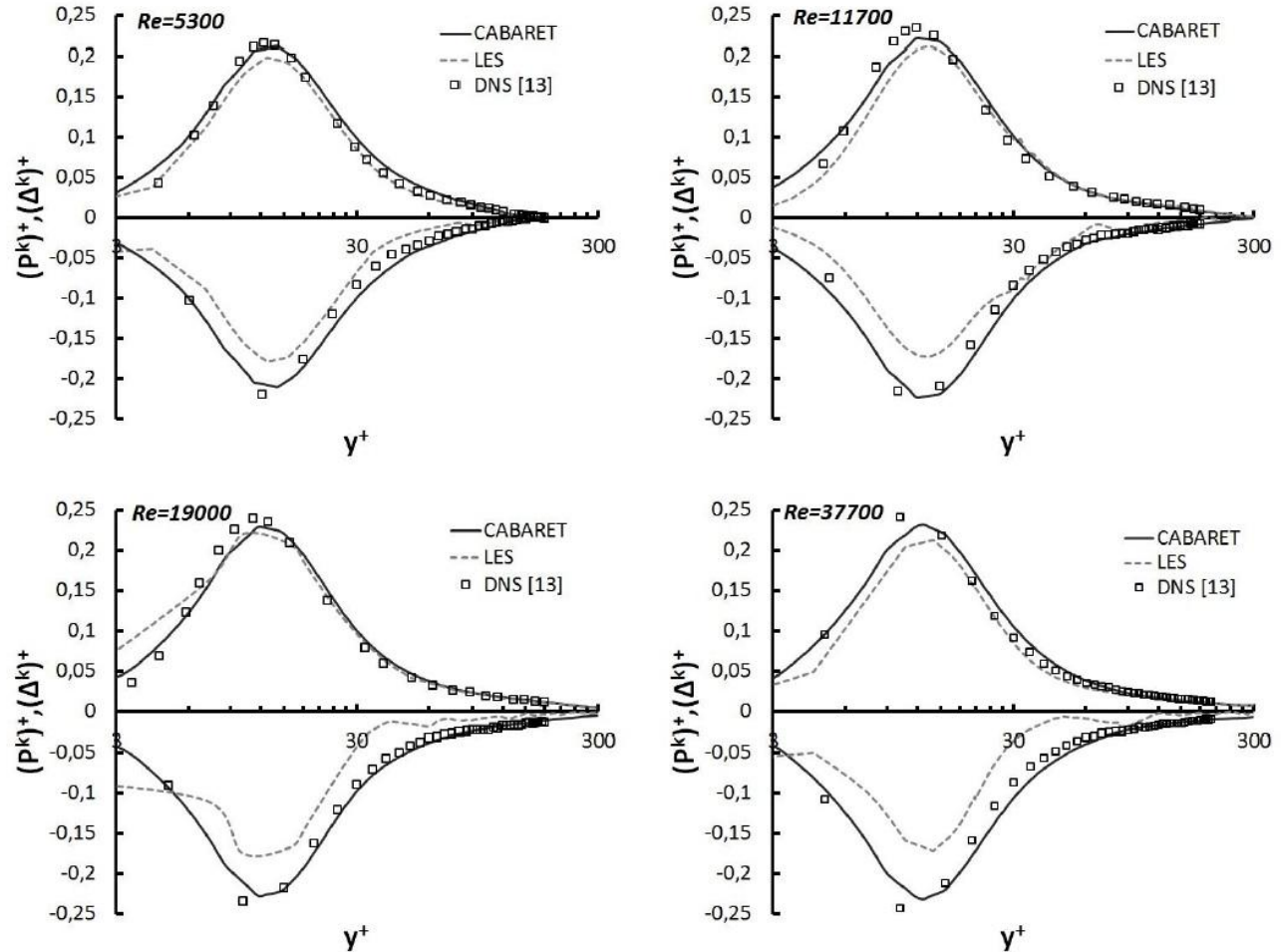


Рис. 6. Баланс кинетической энергии турбулентности (нормировка на u_τ^4/ν).

Скорость генерации и диссипации турб. внутренней энергии

генерация диссипация

$$d\langle T'^2 \rangle / dt = P^T + \varepsilon^T + D^T + T^T$$

$$P^T = -2\langle u'_i T' \rangle \partial \langle T \rangle / \partial x_i$$

$$\varepsilon^T = -2 \cdot a \cdot \langle \partial T' / \partial x_i \cdot \partial T' / \partial x_i \rangle$$

$$D^k = a \cdot \partial^2 \langle T'^2 \rangle / \partial x_i^2$$

$$T^k = -\partial \langle u'_i T'^2 \rangle / \partial x_i$$

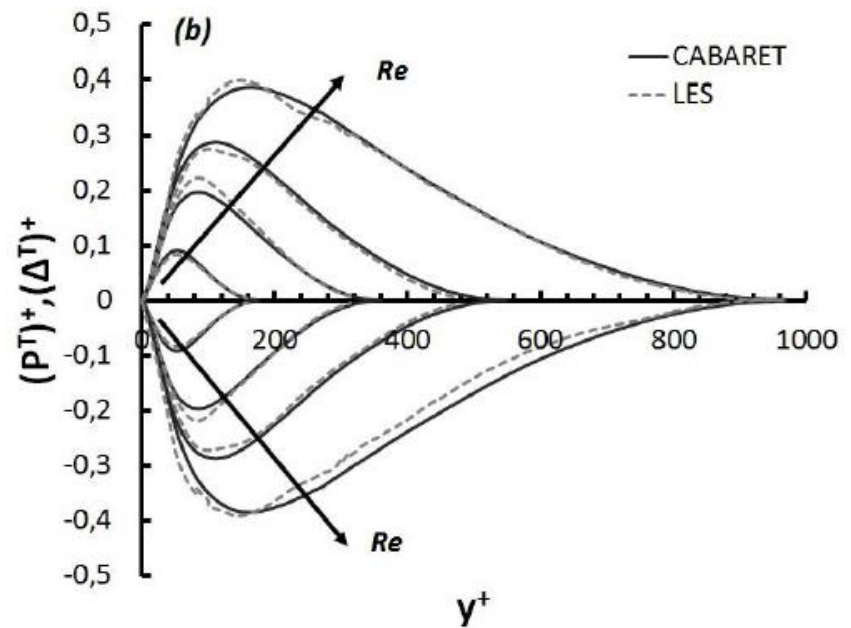
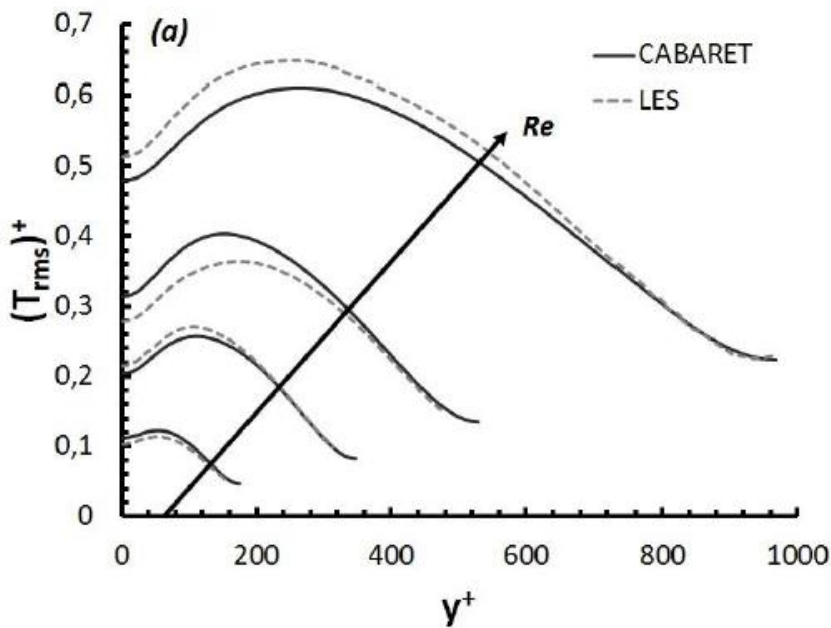


Рис. 7. **a**– RMS пульсации температуры (нормировка на T_τ), **b** – баланс энергии пульсаций температуры (нормировка на $T_\tau^2 u_\tau^2 / a$).

Турбулентные напряжения

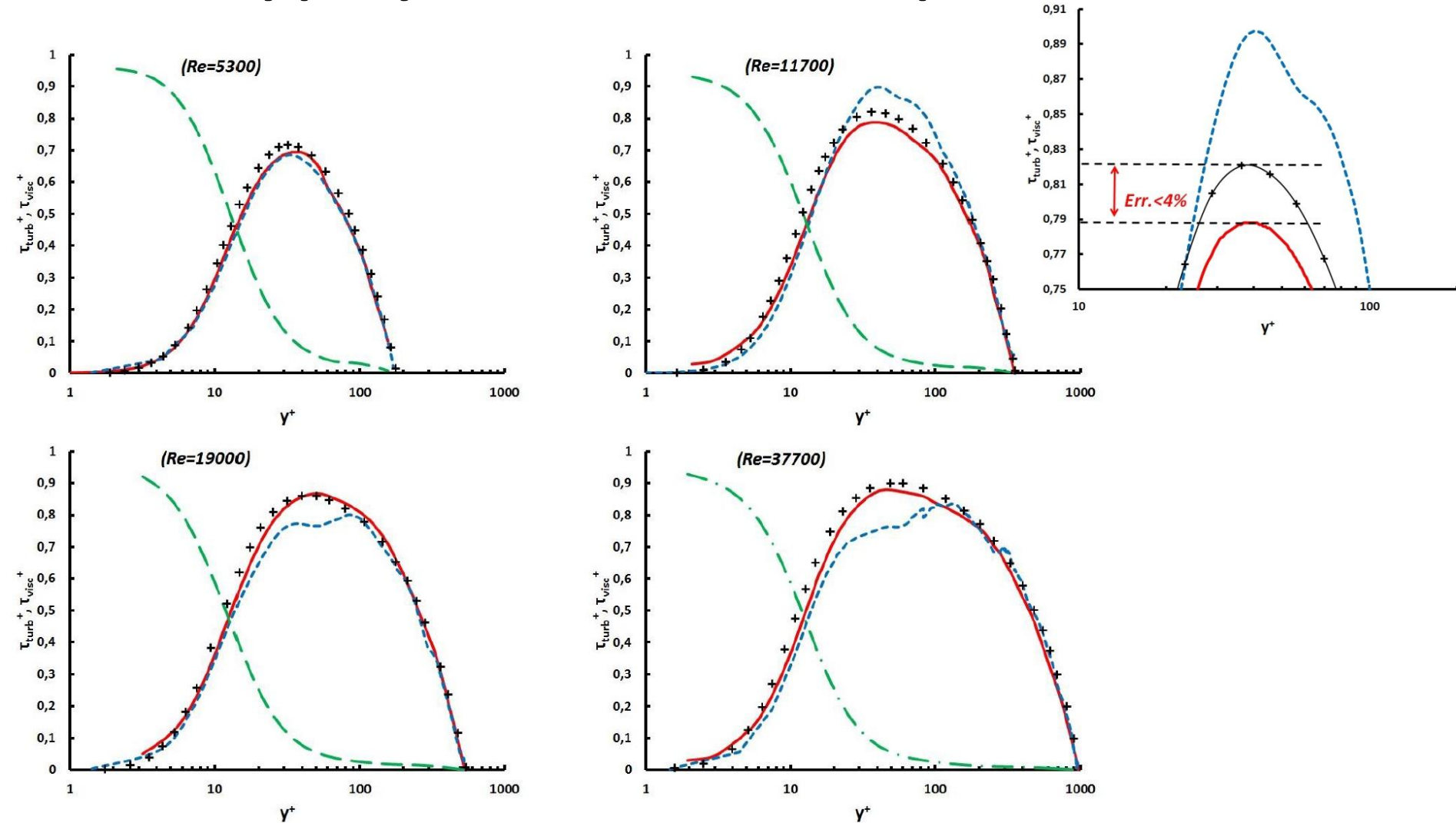


Рис. 10. Турбулентные касательные напряжения $\tau_{turb} = \langle u'_r u'_z \rangle$;
 +, DNS [10]; —, КАБАРЕ; - - -, LES (WALE); вязкие касательные напряжения
 $\tau_{visc} = -\nu \partial \langle u_z \rangle / \partial r$ - - -, КАБАРЕ (нормировка на u_τ^2).

Турбулентные числа Прандтля

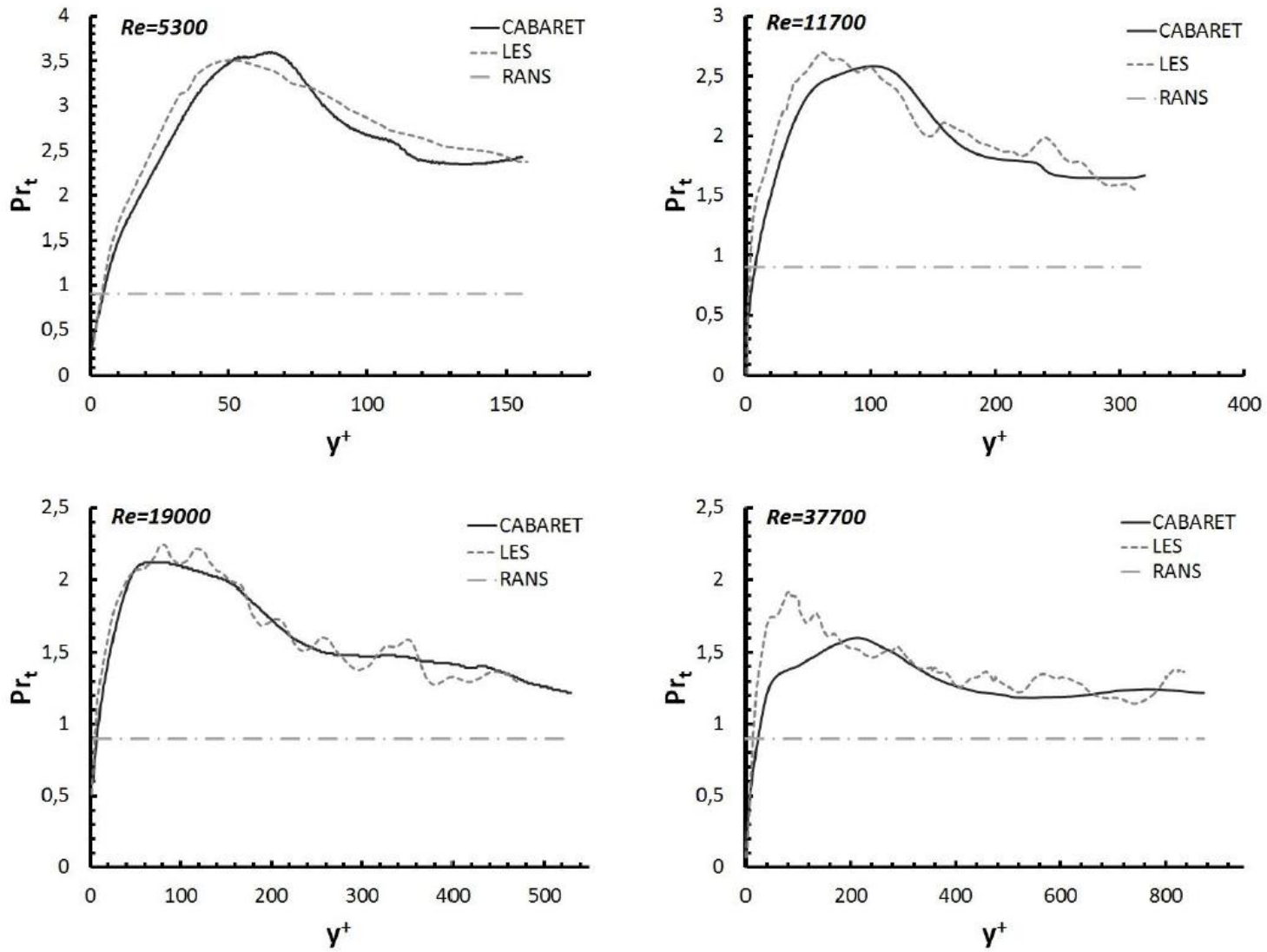
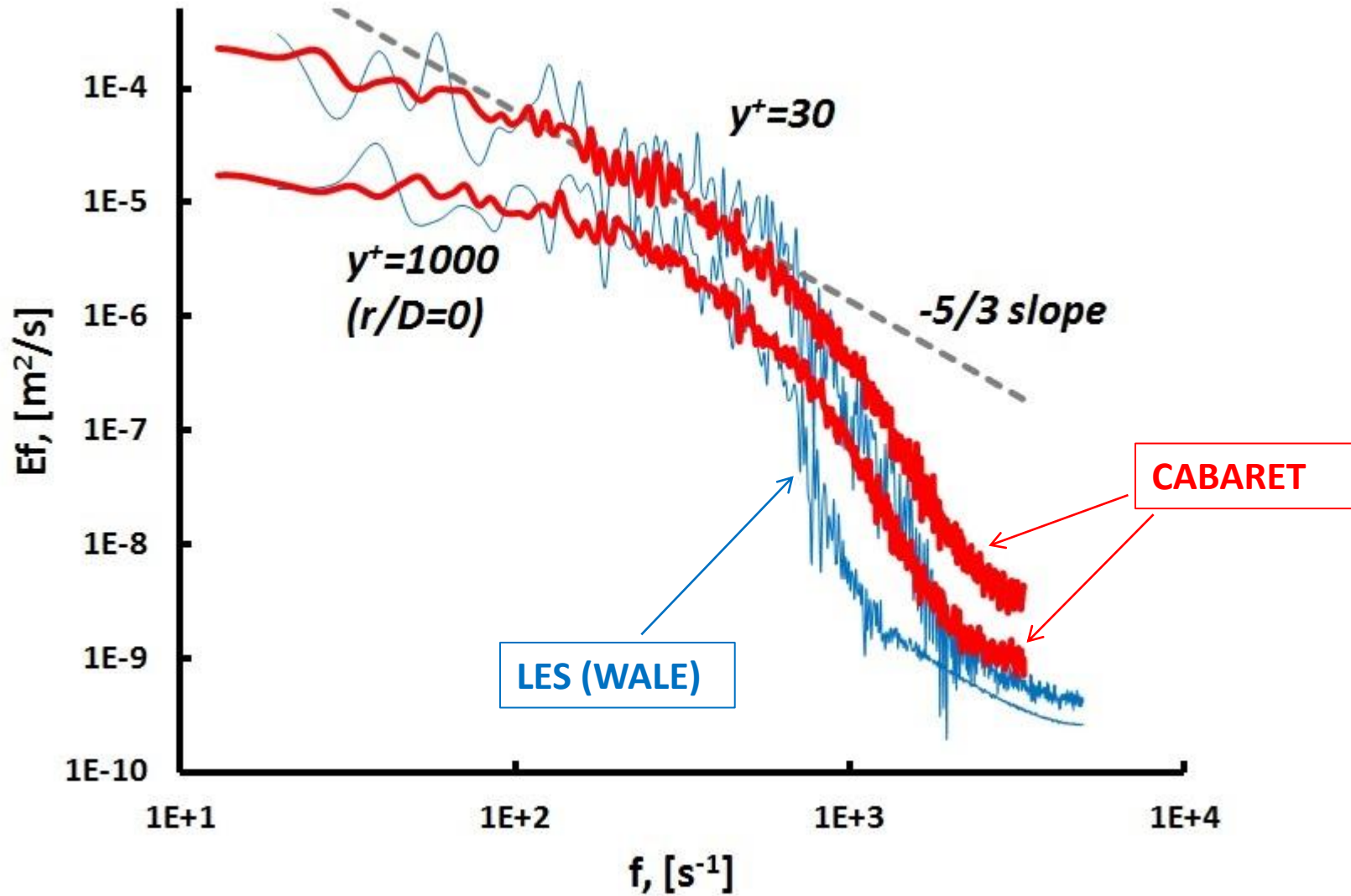
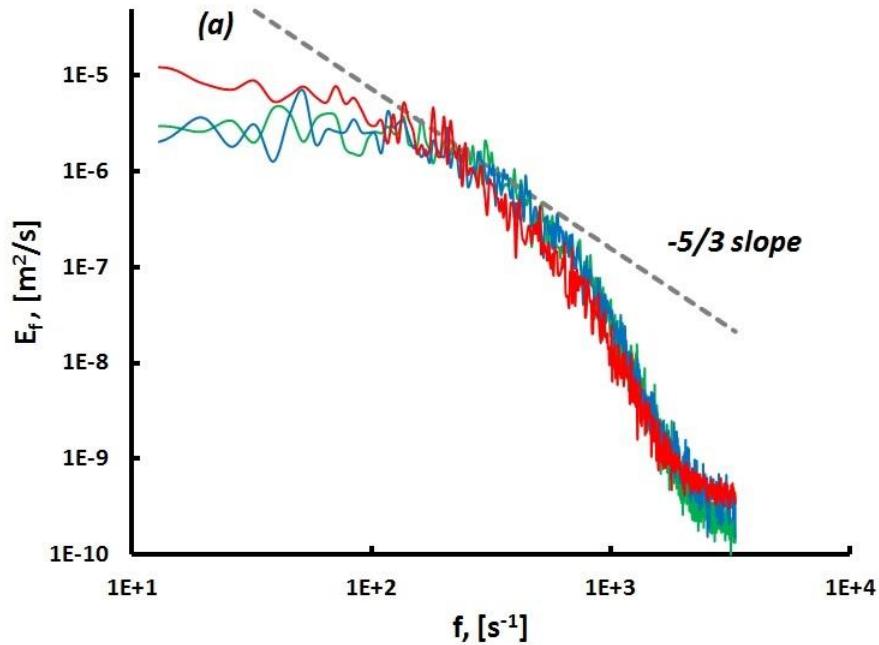


Рис.15. Турбулентное число Прандтля.

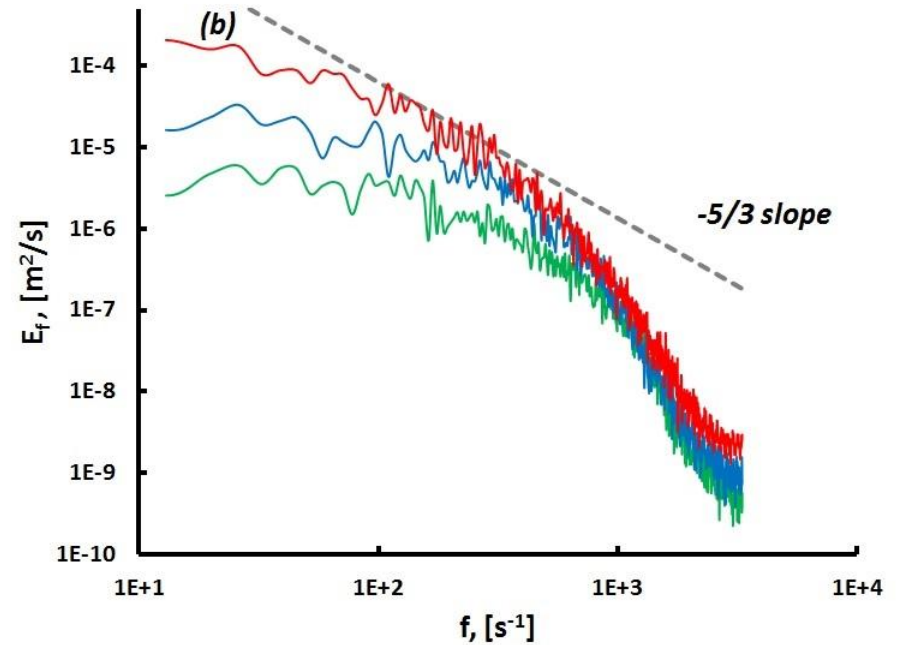
Спектр турбулентной кинетической энергии



Спектр по компонентам скорости

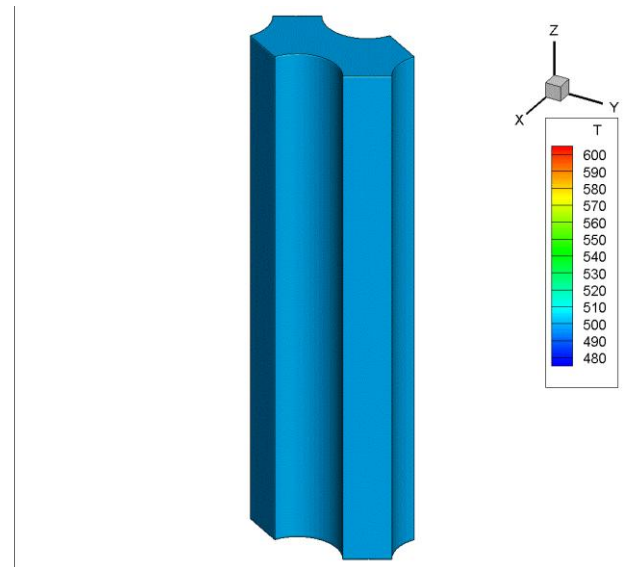
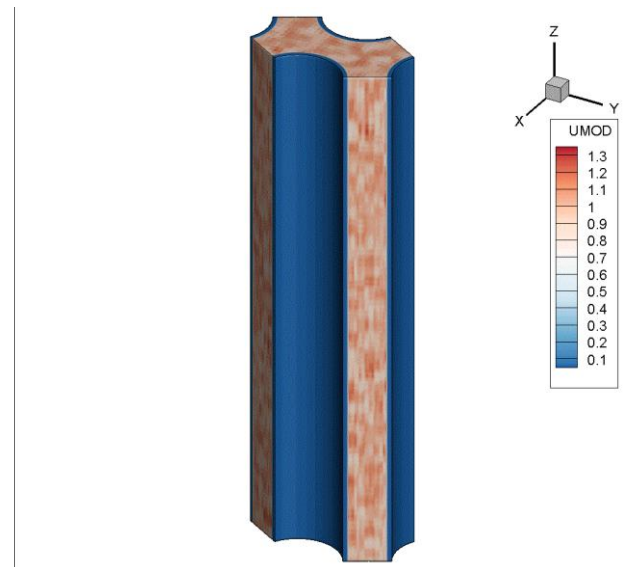
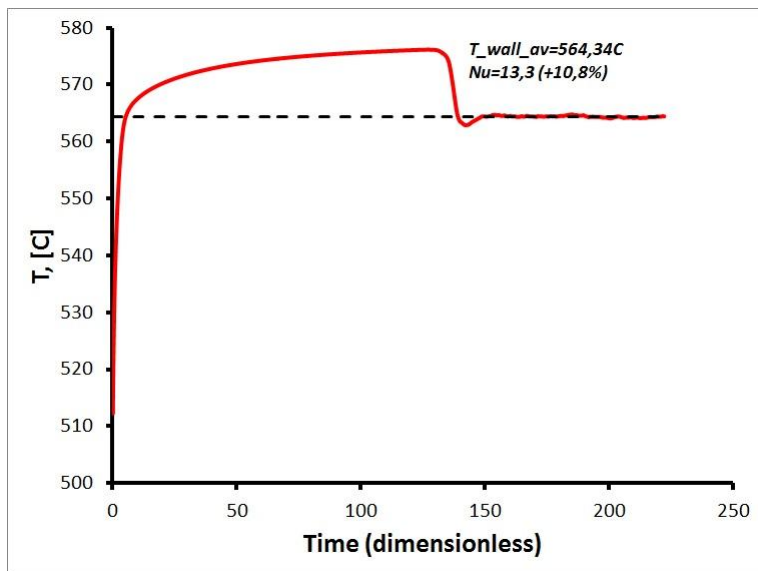
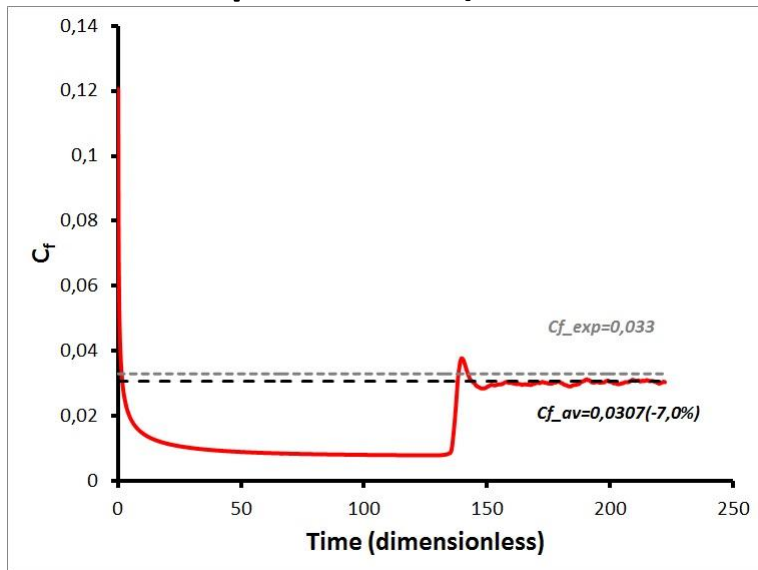


Изотропный спектр
(центр трубы)



Анизотропный спектр
(боковая стенка)

Продольное обтекание тепловыделяющего пучка стержней (ТВС БРЕСТ). $Re=15000 - 150000$



Спасибо за внимание!