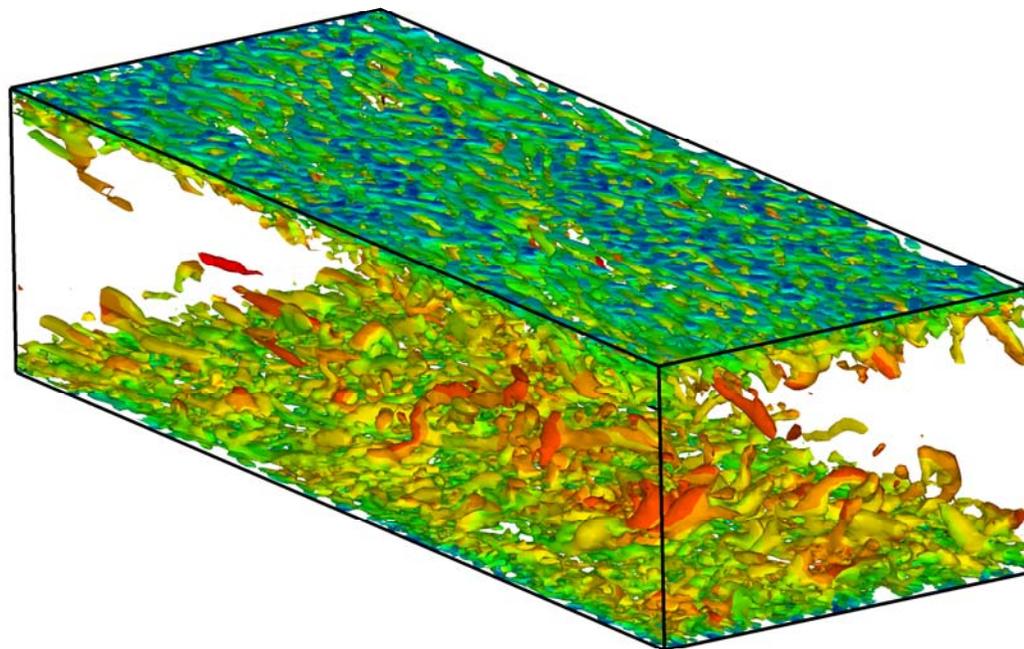


Развитое течение в канале



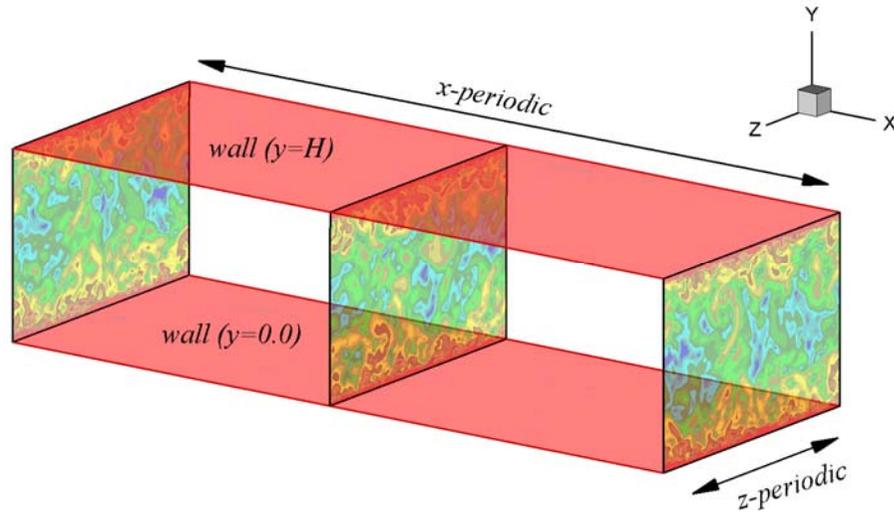
Зачем этим заниматься

Это второй шаг в освоении LES (DNS) вообще, и первый шаг для отработки LES (DNS) пристенных течений.

Цели:

1. Убедиться в пригодности численной схемы для расчета пограничных слоев по LES (DNS).
2. Понять принципы построения сеток для LES.
3. Научится осреднять и правильно строить осредненные величины.
4. Проверка реализованных моделей турбулентности

Основные определения

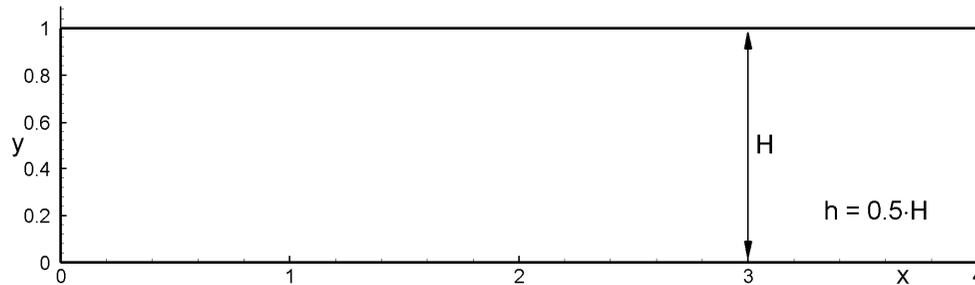


$$\text{Re}_\tau = u_\tau \cdot h / \nu$$

$$u_\tau = (\nu \cdot \partial u / \partial y)_w^{1/2}$$

H – высота канала

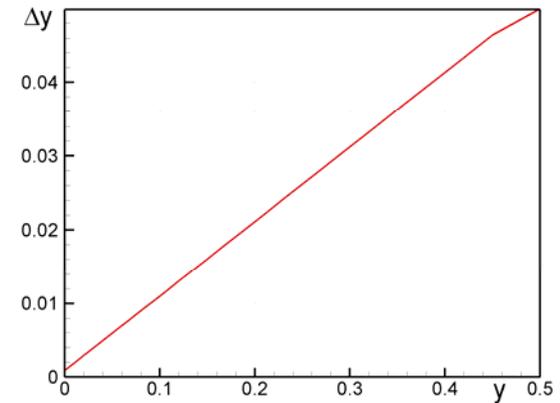
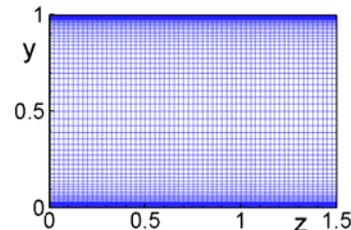
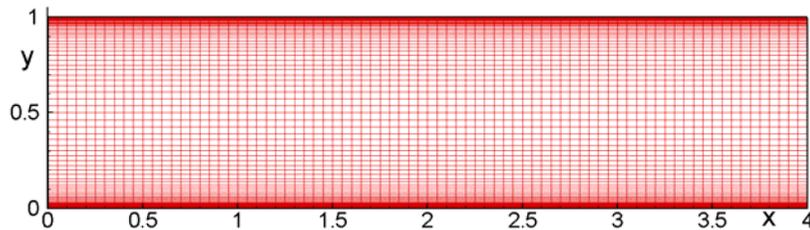
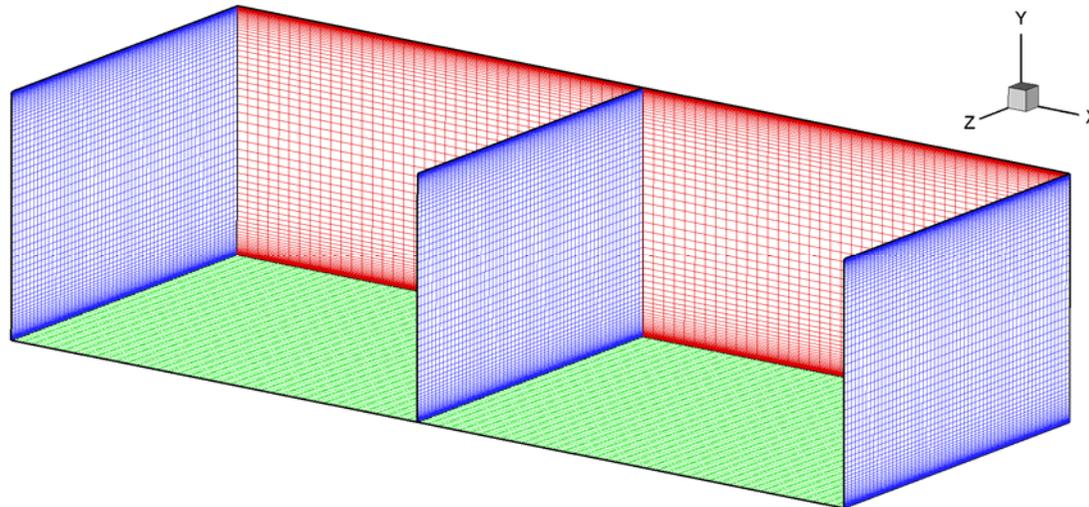
h = H/2 – полувысота канала



$$\partial p / \partial x = \rho \cdot u_\tau^2 / h$$

Сетка

Общее число узлов сетки $N_x \times N_y \times N_z = 81 \times 77 \times 61 = 380457$



$$\Delta_x = 0.05H, \Delta_z = 0.025H, (\Delta_y)_w = 10^{-3}H$$

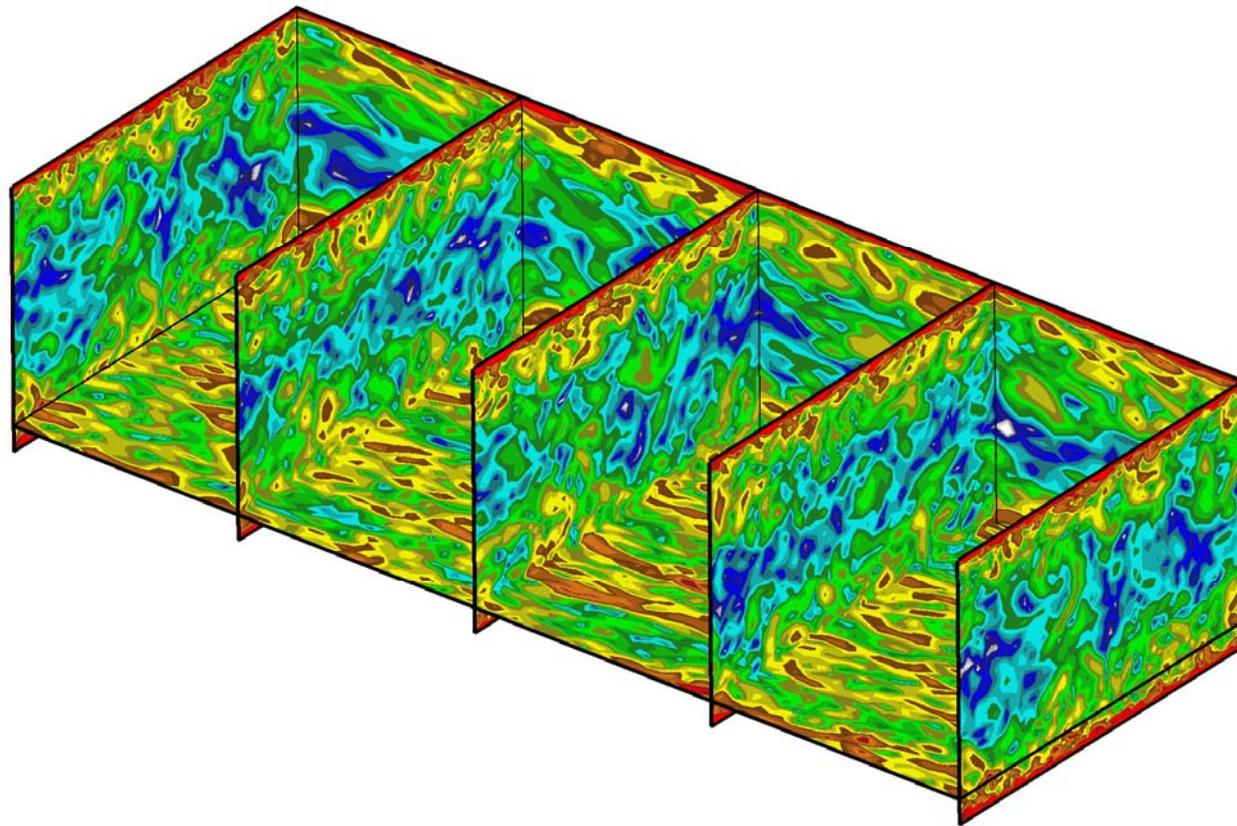
$$\Delta_x^+ = 40, \Delta_z^+ = 20$$

$$(\Delta_y)_w^+ \leq 1, \Delta_z^+ \leq (\Delta_y)_c^+ \leq \Delta_x^+$$

$$\Delta^+ = \Delta \cdot u_\tau / \nu$$

Анизотропия сетки

$$\Delta_x > \Delta_z$$



сетка для DNS

Очень хороший DNS:

$$\Delta_x^+ = 10, \Delta_z^+ = 7$$

$$(\Delta_y^+)_w \leq 1, \Delta_z^+ \leq (\Delta_y^+)_c \leq \Delta_x^+$$

Хороший DNS:

$$\Delta_x^+ = 15, \Delta_z^+ = 10$$

Нормальный DNS:

$$\Delta_x^+ = 20, \Delta_z^+ = 10$$

Дальше уже не DNS

сетка для LES

Очень хороший LES:

$$\Delta_x^+ = 20, \Delta_z^+ = 10$$

Хороший LES:

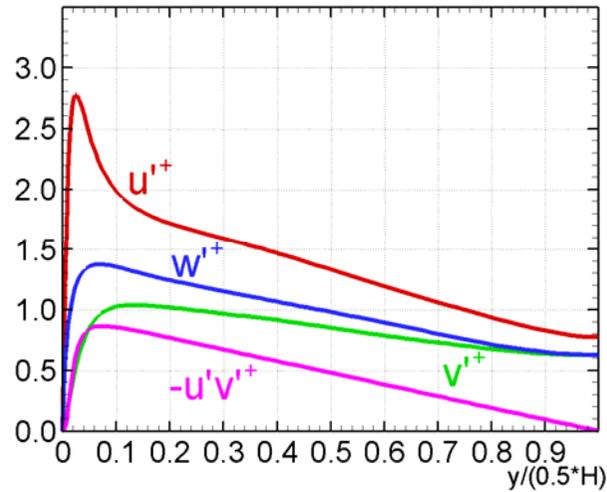
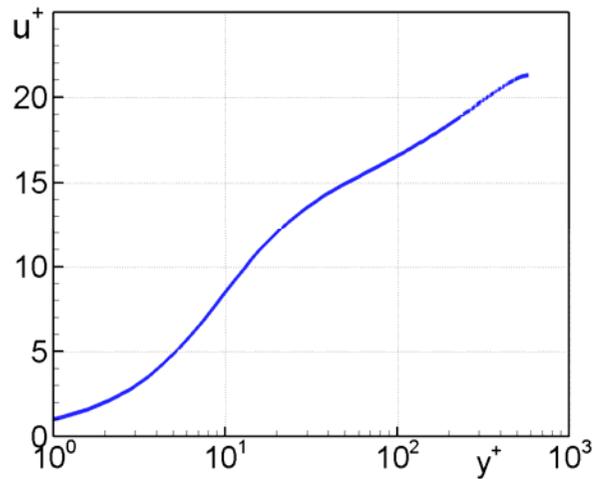
$$\Delta_x^+ = 40, \Delta_z^+ = 20$$

Нормальный LES:

$$\Delta_x^+ = 60, \Delta_z^+ = 30$$

Дальше уже не LES

На что обычно смотрят



$$u_\tau = (\nu \cdot \partial u / \partial y)_w^{1/2}$$

$$y^+ = y \cdot u_\tau / \nu$$

$$u^+ = u / u_\tau$$

$$u'^+ = (\langle u'u' \rangle)^{1/2} / u_\tau$$

$$u'v'^+ = \langle u'v' \rangle / u_\tau^2$$

$$\langle u_i' u_j' \rangle = \langle u_i u_j \rangle - \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle \quad \text{разрешенные напряжения}$$

$$\langle \tau_{ij} \rangle = -2 \langle \nu_t \cdot S_{ij} \rangle + 2/3 \cdot \langle k_t \rangle \cdot \delta_{ij} \quad \text{моделируемые напряжения}$$

$$\langle \tau_{total} \rangle = \langle u_i' u_j' \rangle + \langle \tau_{ij} \rangle \quad \text{полные напряжения}$$

Начальное приближение

$$u = \langle u \rangle + u'$$

$$v = \langle v \rangle + v'$$

$$w = \langle w \rangle + w'$$

$$\langle u \rangle = u_0$$

$$\langle v \rangle = 0$$

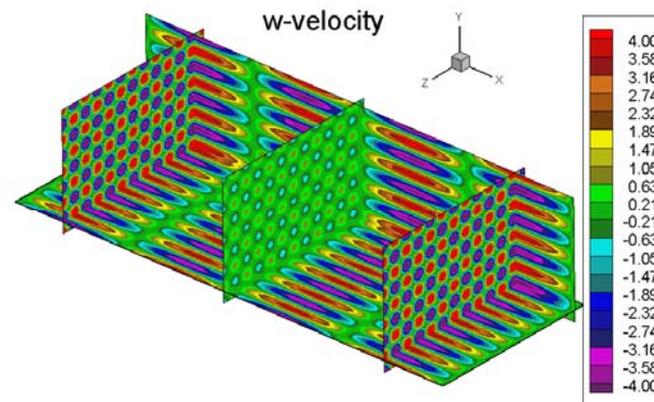
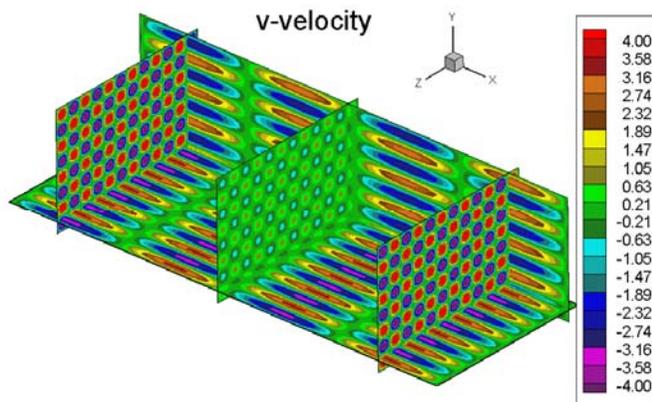
$$\langle w \rangle = 0$$

$$u_0 = U_b \approx 20 \cdot u_\tau$$

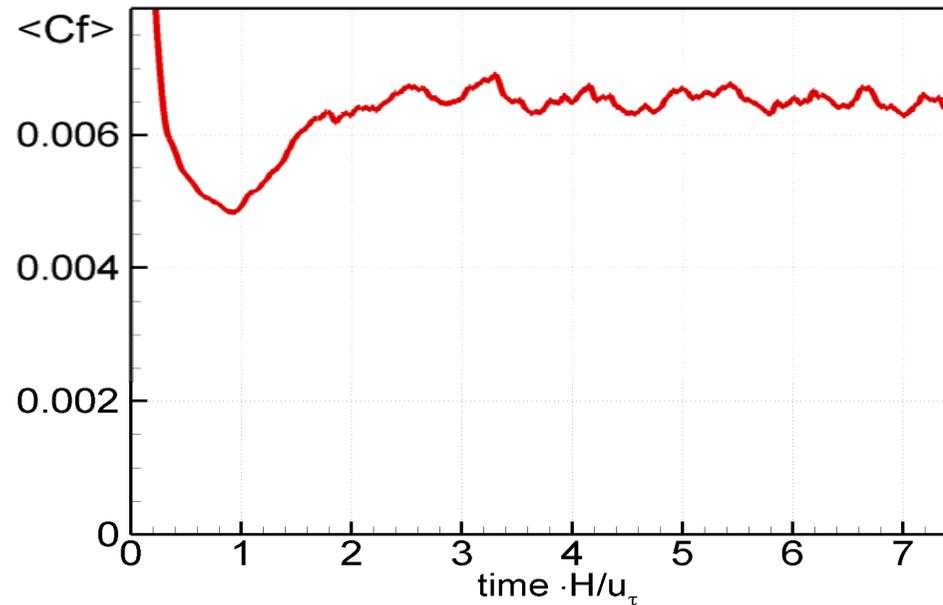
$$u' = 0$$

$$v' = 0.3 \cdot u_0 \cdot \sin\left(0.5 \frac{2\pi x}{H}\right) \cdot \sin\left(4.0 \frac{2\pi y}{H}\right) \cdot \sin\left(4.0 \frac{2\pi z}{H}\right)$$

$$w' = 0.3 \cdot u_0 \cdot \sin\left(0.5 \frac{2\pi x}{H}\right) \cdot \cos\left(4.0 \frac{2\pi y}{H}\right) \cdot \cos\left(4.0 \frac{2\pi z}{H}\right)$$



Сколько считать и осреднять

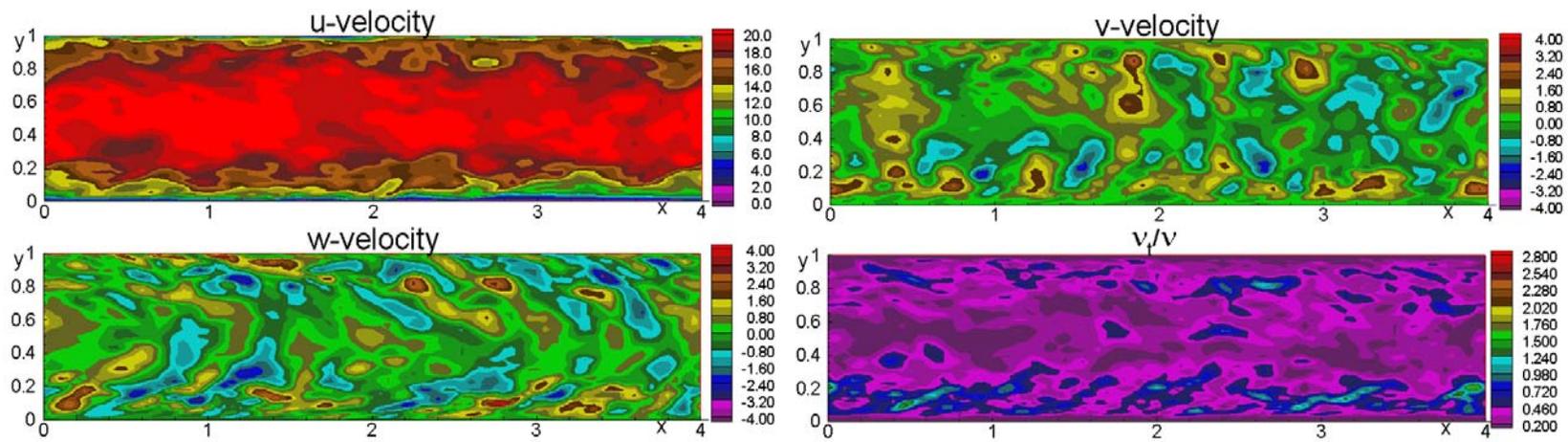


$$T = T_{init} + T_{aver} = 150 \cdot H / U_b = 7.5 \cdot H / u_\tau$$

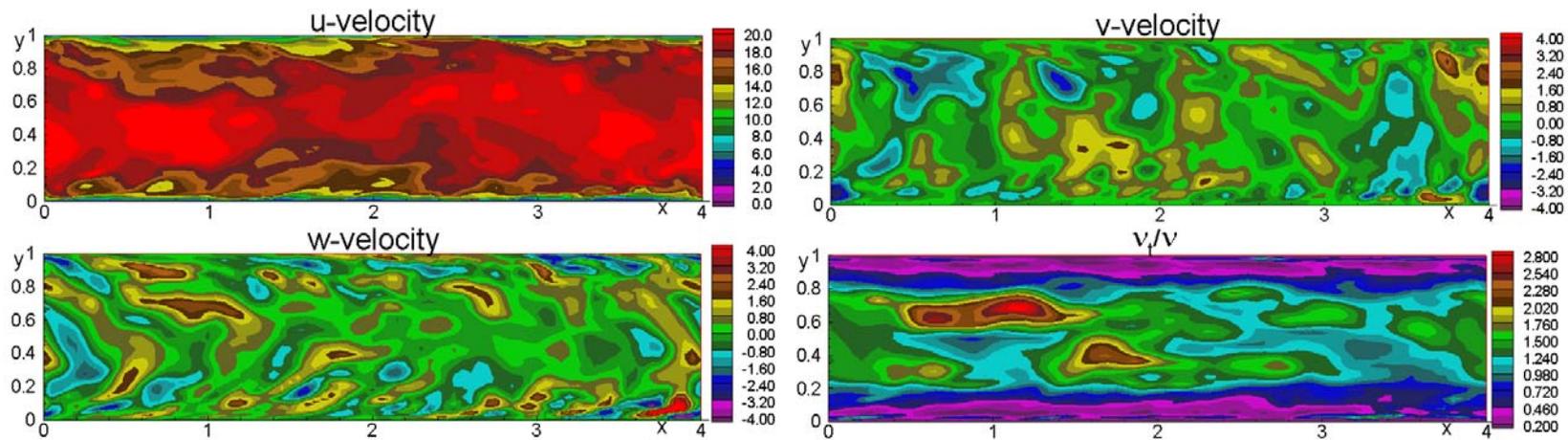
$$T_{init} = 50 \cdot H / U_b = 2.5 \cdot H / u_\tau$$

$$T_{aver} = 100 \cdot H / U_b = 5.0 \cdot H / u_\tau$$

Мгновенные поля

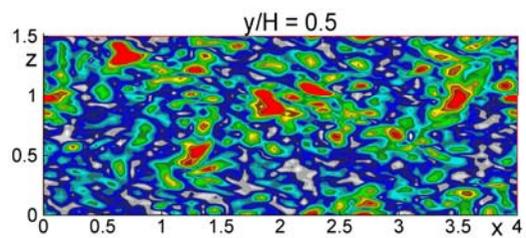
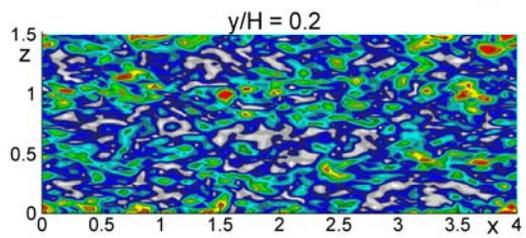
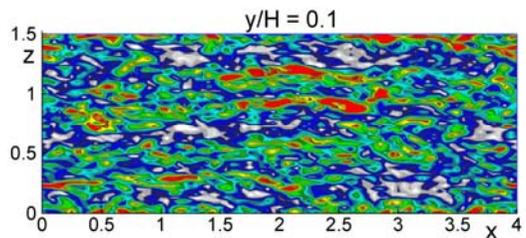
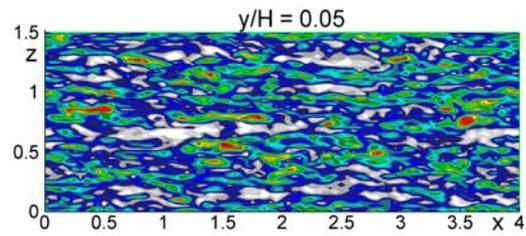
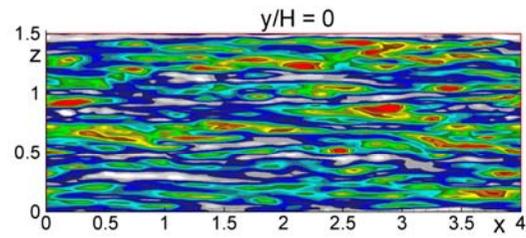


Модель Смагоринского



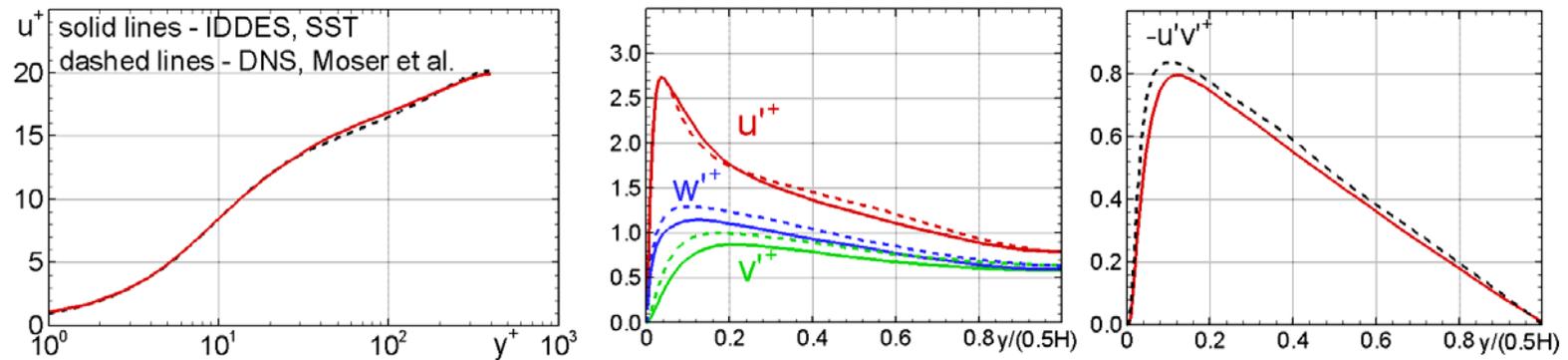
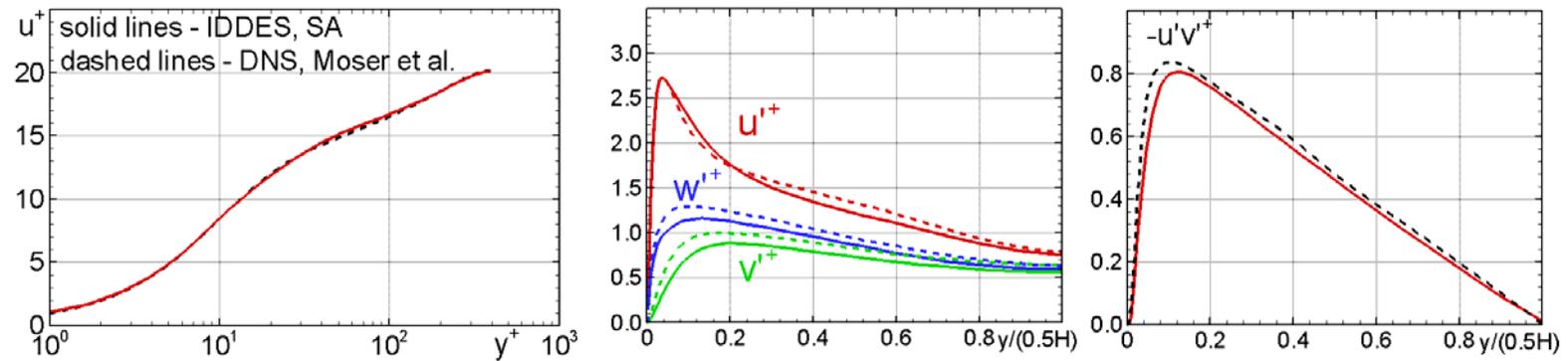
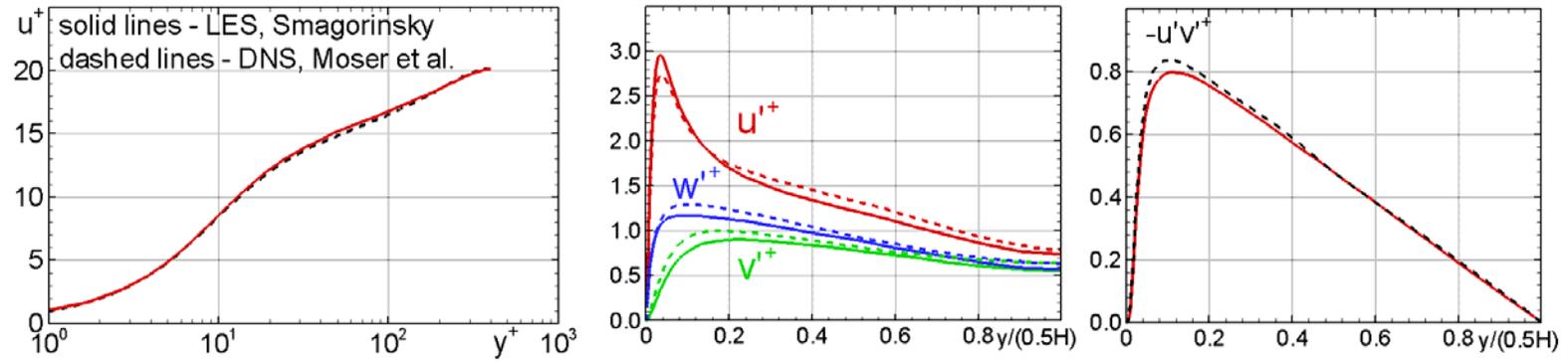
SA IDDES

Мгновенные поля завихренности

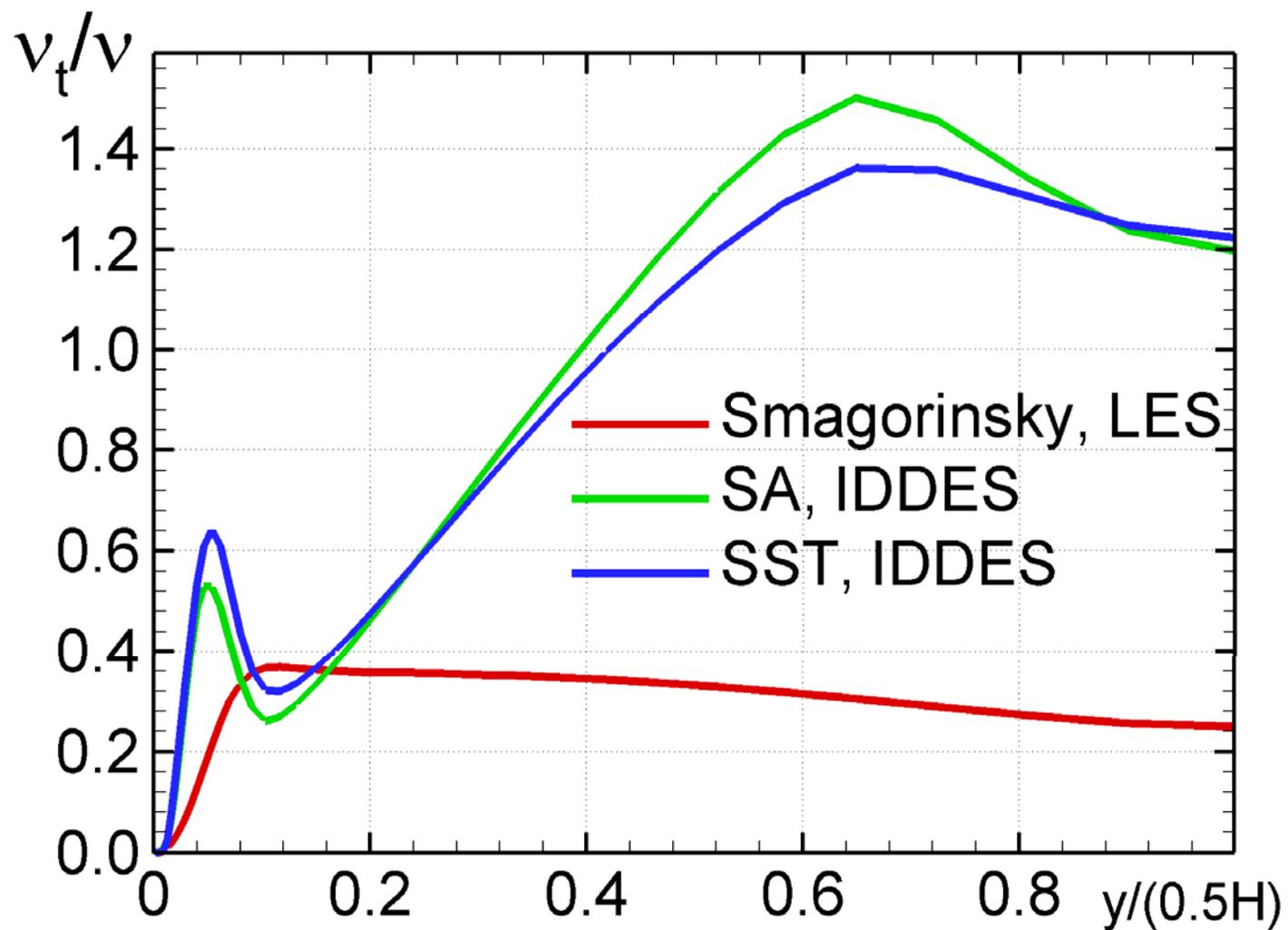


Модель Смагоринского

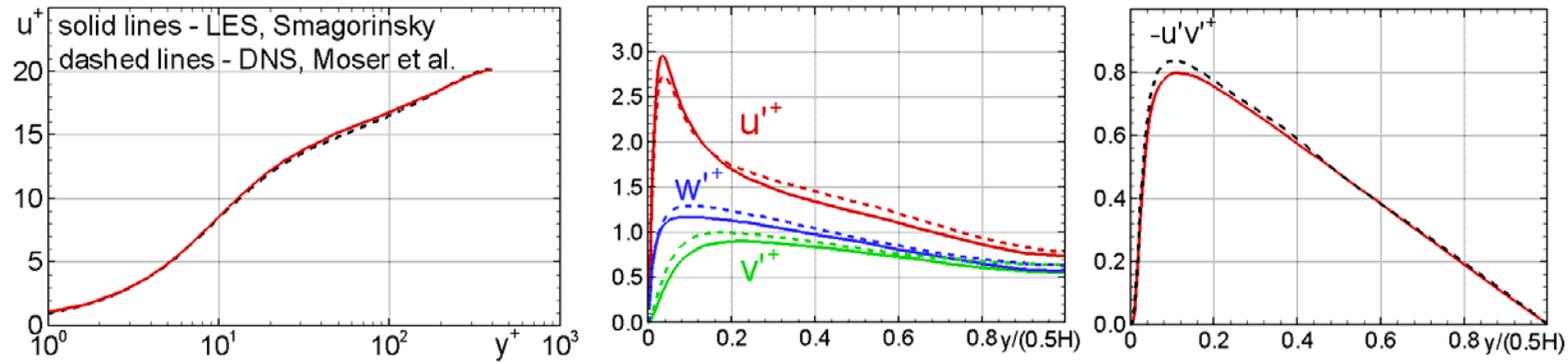
Осредненные профили скорости и напряжений



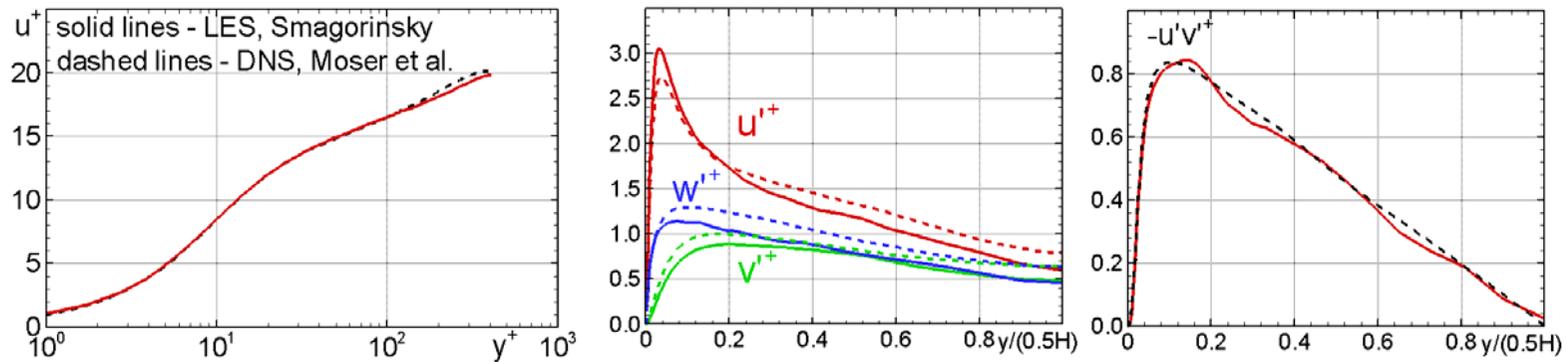
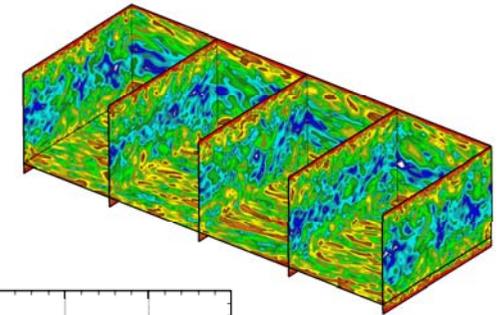
Осредненная турбулентная вязкость



Быстрый анализ результатов



Осреднение по времени и пространству



Осреднение по пространству

Напоследок

Наилучший порядок действий:

1. Двумерное стационарное течение (2D RANS).
2. Трехмерное нестационарное течение без модели турбулентности (плохой DNS).
3. Трехмерное нестационарное течение с моделью турбулентности (LES)