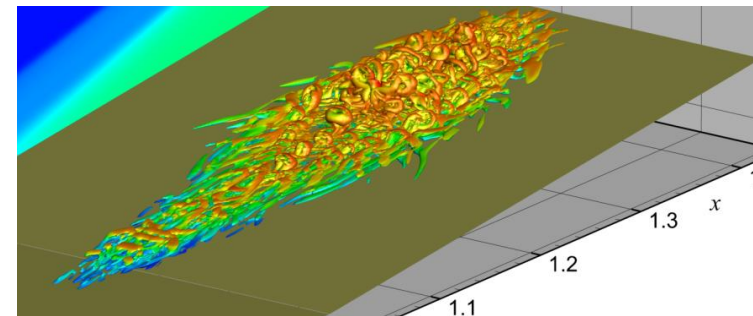


# ПАКЕТ РАСЧЁТНЫХ ПРОГРАММ HSFLOW. ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА ПРИ ГИПЕРЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ.

Андрей В. Новиков, к.ф.-м.н.

Иван В. Егоров, д.ф.-м.н, чл.корр. РАН



# Пакет расчётных программ HSFlow

- HSFlow = High-Speed Flow solver (с) НИО-8 ЦАГИ
- Моделирование течений сжимаемого вязкого газа с помощью численного решения нестационарных уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса в двухмерной, осесимметричной и трёхмерной постановках
- Уравнения в консервативной безразмерной форме в криволинейных координатах
- Неявный численный метод конечного объёма второго порядка точности по пространству и времени
- Схема TVD (total variation diminishing) типа Годунова второго порядка аппроксимации по пространству
- Структурированные расчётные сетки

# Расчётные сетки. Формат ввода вывода.

- Структурированные многоблочные сетки
- Стыковка между блоками типа *блок-в-блок* и *узел-в-узел*.
- Формат для хранения расчётных сеток и полей течений – международный стандарт CGNS (CFD General Notation System).
  - Разрабатывается международным комитетом «CGNS Steering Committee» (изначально в 1994 году Boeing и NASA) - <http://cgns.github.io/>
  - Компактный бинарный файл, доступ к данным посредством набора библиотечных кроссплатформенных процедур
  - Подробная документация, свободные реализации библиотеки, поддержка в большинстве коммерческих приложений (Pointwise, Ansys, TecPlot, etc.)
  - В HSTFlow применяется последняя на 2015.11 версия 3.2.1

# Метод параллельного решения

- Дискретизация системы в частных производных в каждом блоке независимо

$$\frac{3\mathbf{Q}_{i,j,k}^{n+1} - 4\mathbf{Q}_{i,j,k}^n + \mathbf{Q}_{i,j,k}^{n-1}}{2\Delta t} + \frac{\mathbf{E}_{i+1/2,j,k}^{n+1} - \mathbf{E}_{i-1/2,j,k}^{n+1}}{\Delta \xi} + \frac{\mathbf{G}_{i,j+1/2,k}^{n+1} - \mathbf{G}_{i,j-1/2,k}^{n+1}}{\Delta \eta} + \frac{\mathbf{F}_{i,j,k+1/2}^{n+1} - \mathbf{F}_{i,j,k-1/2}^{n+1}}{\Delta \zeta} = \mathbf{S}$$

- Распределённый вектор невязок  
нелинейная система сеточных (алгебраических) уравнений:  $\mathbf{F}(\mathbf{X}) = 0$
- Вектор  $\mathbf{X}$  – искомые функции во всех узлах сетки.  
Например для сетки 500млн, вектор содержит  $2.5\text{e}+9$  значений  $> \text{MAX\_INT} = 2.14\text{e}+9$ .  
**Для индексации требуется int64**
- Нелинейная система решается по методу Ньютона  $\mathbf{X}^{[k+1]} = \mathbf{X}^{[k]} - \epsilon_{k+1} \mathbf{D}_{k_0}^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{X}^k)$   
 $\mathbf{D}_{k_0} = (\partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{X})_{k_0}$  матрица Якоби по методу конечных приращений вектора невязки по вектору искомых сеточных переменных (параллельно)
- На каждой итерации Ньютона, решается линейная система уравнений методом GMRes  
 $(\partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{X})_{k_0} \Delta \mathbf{X}^{[k]} = -\epsilon_{k+1} \mathbf{F}(\mathbf{X}^{[k]})$

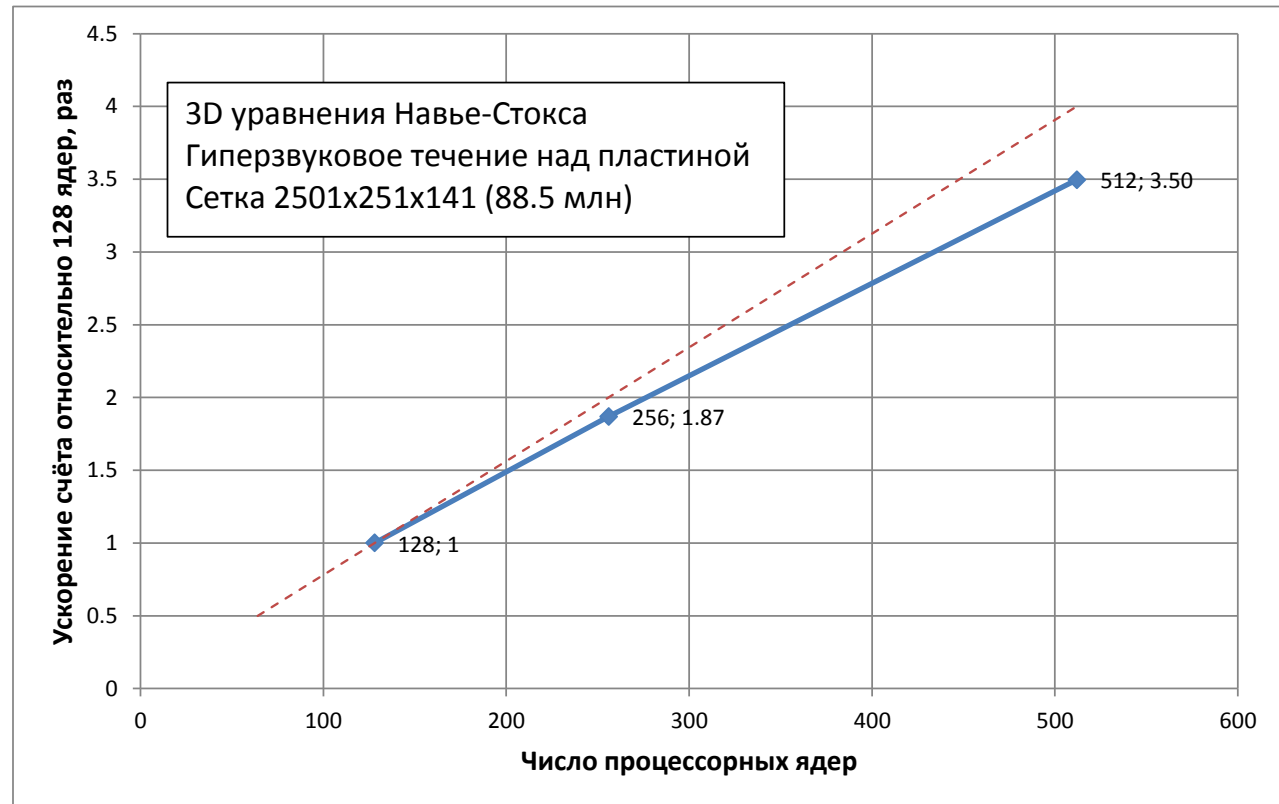
- Решение с помощью **PETSc**:
  - Операции с распределёнными векторами и матрицами
  - Параллельный метод deflated GMRes (**DGMRES**) с предобуславливателем Additive Schwarz Method (ASM)

# PETSc: Portable, Extensible Toolkit for Scientific Computation

- Библиотека структур данных и процедур для распределённого (параллельного) решения научных задач, моделируемых уравнениями в частных производных
- Кроссплатформенная (Windows, Linux, etc.)
- Возможно применение в приложениях написанных на C/C++, Fortran, Python
- Использует MPI и BLAS
- Распространение в исходных кодах, свободное использование для любых целей
- <http://www.mcs.anl.gov/petsc/>

# Производительность HSFlow на вычислительном кластере

- ❑ Расчёт на кластере лаборатории МФТИ *Flowmodellium* из вычислительных узлов с двумя 12ми-ядерными процессорами *Intel Xeon E5-2697 v2*
- ❑ Почти линейная масштабируемость



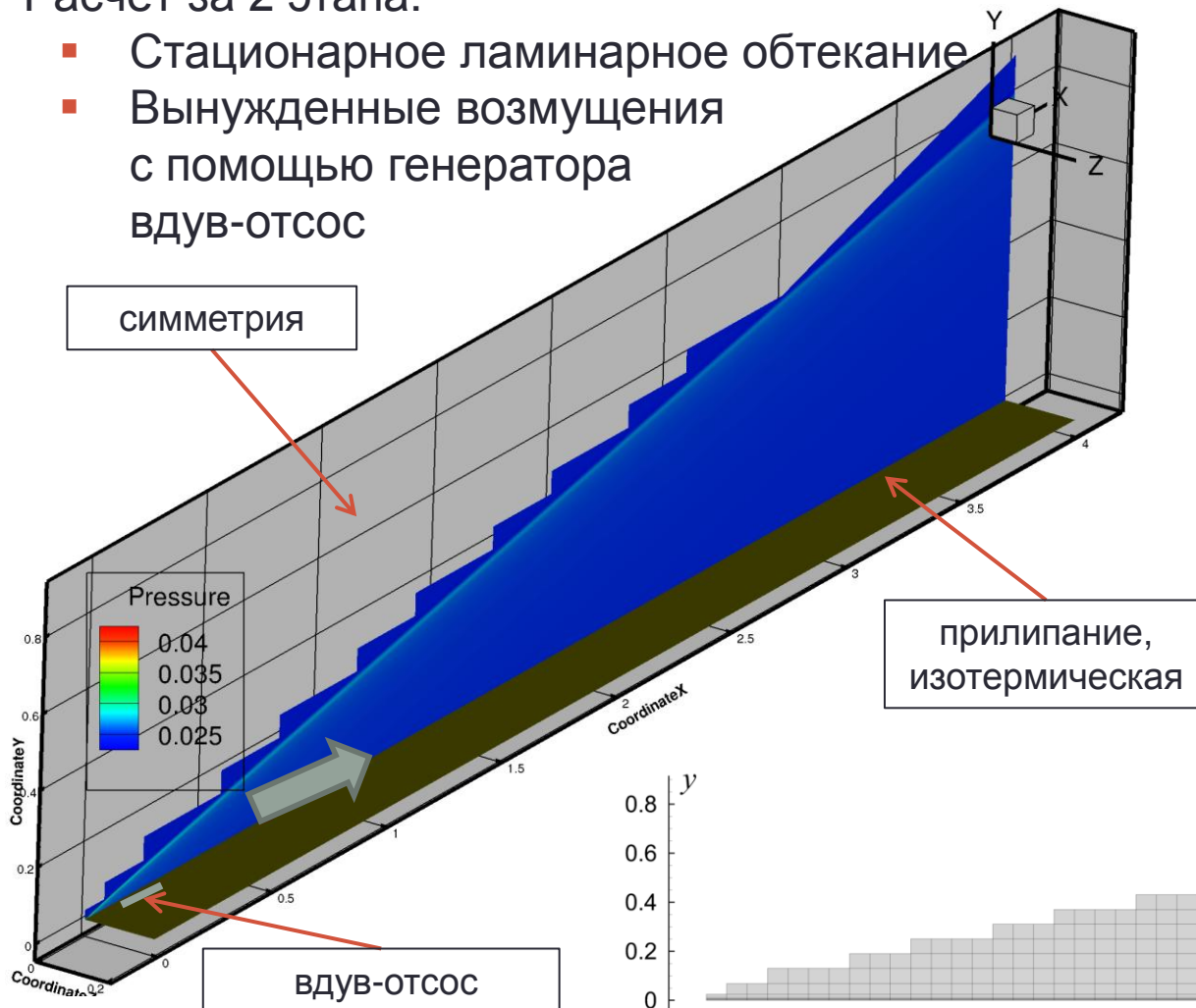
# ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНО- ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА ПРИ ГИПЕРЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ.

---

Распространение 3D возмущений над пластиной

# Постановка задачи

- 3D уравнения Навье-Стокса для вязкого сжимаемого совершенного газа
- Расчёт за 2 этапа:
  - Стационарное ламинарное обтекание
  - Вынужденные возмущения с помощью генератора вдув-отсос



$$M_{\infty} = 5.373$$

$$Re_{\infty 1} = 14.3 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$$

$$L^* = 0.3161 \text{ m}$$

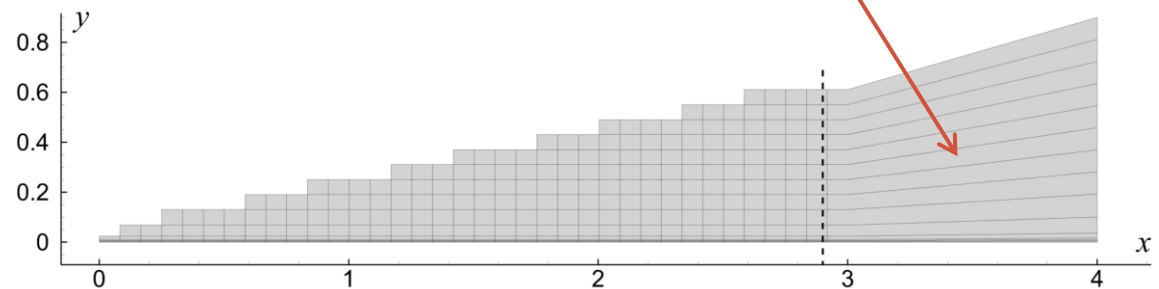
$$Re_{\infty L} = 5.667 \times 10^6$$

$$T_{\infty} = 74.194 \text{ K}$$

$$T_w = 300.0 \text{ K} = 4.043$$

$$\gamma = 1.4; \text{Pr} = 0.71$$

Сетка **250 млн** узлов



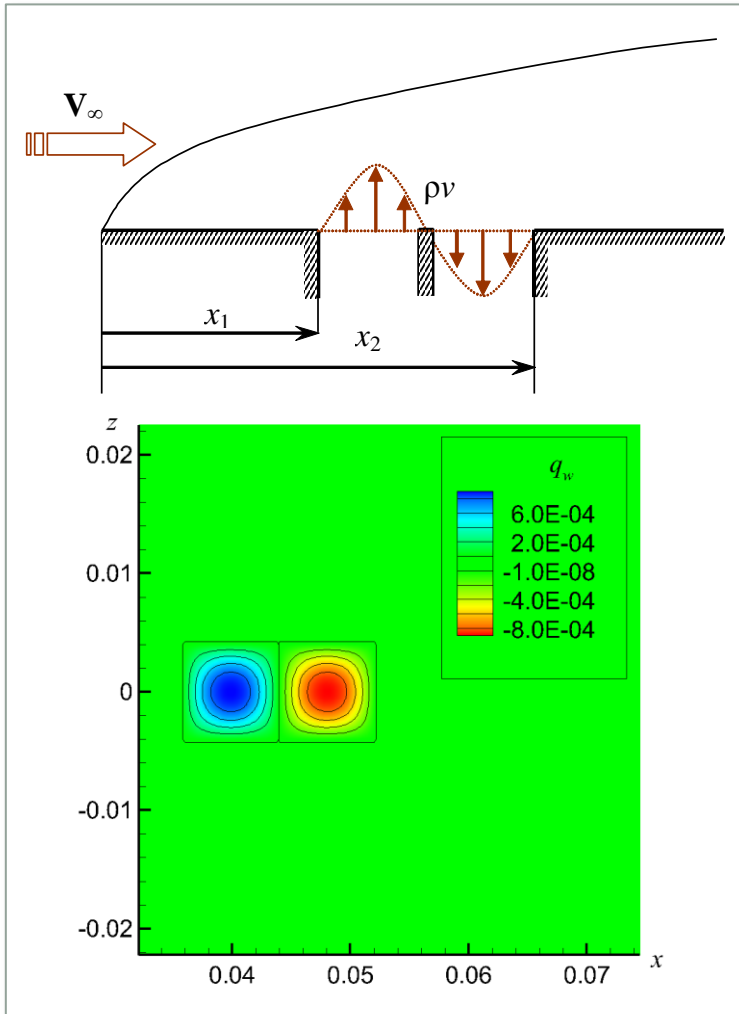


# Вычислительные ресурсы

- ❑ Сетка 250 миллионов узлов, 1152 блока
- ❑ Расчёт на кластере лаборатории Flowmodellium, МФТИ, 1152 процессорных ядра (48 x 24)
- ❑ Файл расчётного поля – 9.34Гб + файл сетки 5.6Гб
- ❑ 10000 шагов по времени

# Генератор возмущений

❑ Вдув-отсос через 2 квадратных отверстия на стенке



ГУ на массовый расход на стенке:

$$\rho_w v_w = \varepsilon \times \sin\left(2\pi \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}\right) \times \sin\left(\pi \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}\right) \times \sin(\omega t)$$

$$x_1 < x < x_2; z_1 < z < z_2; 0 < t < \infty$$

$$d = 0.00815 \text{ (} d^* = 2.6 \text{ mm)}$$

$$x_1 = x_0 - d; x_2 = x_0 + d; 1) x_0 = \mathbf{0.044}$$

$$z_1 = -d/2; z_2 = d/2$$

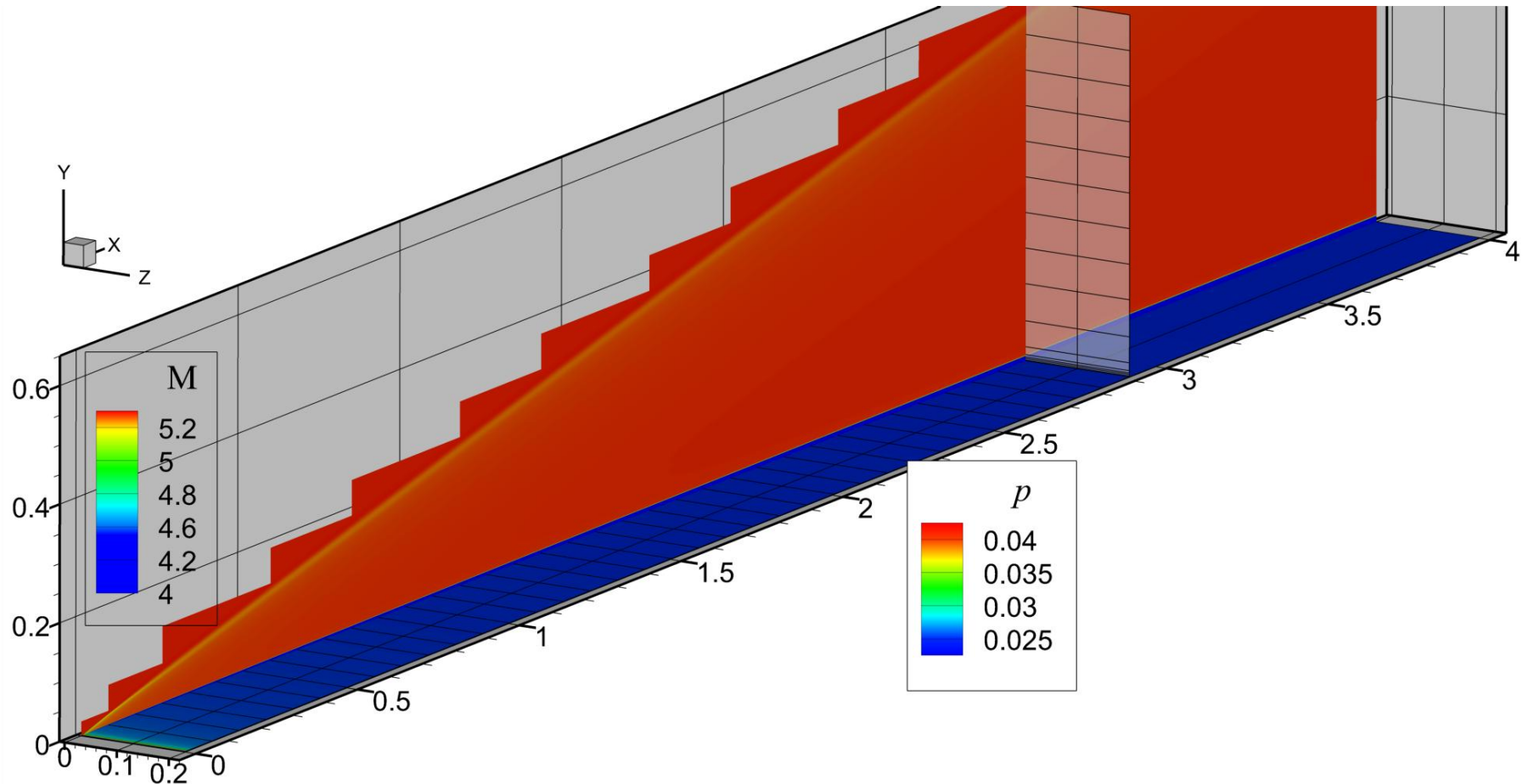
Частота воздействия:

- $\omega = 125$  ( $f^* = 58.37 \text{ kHz}$ ) – типично для I моды

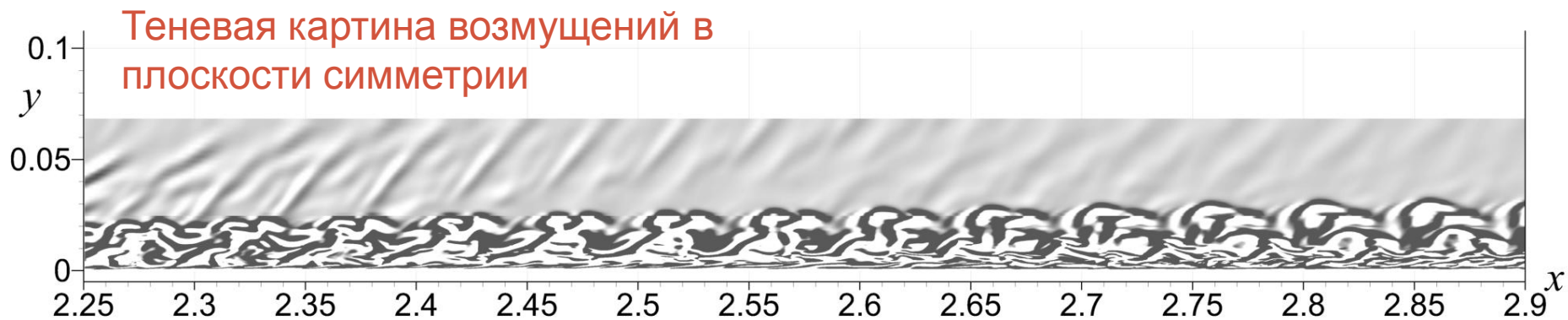
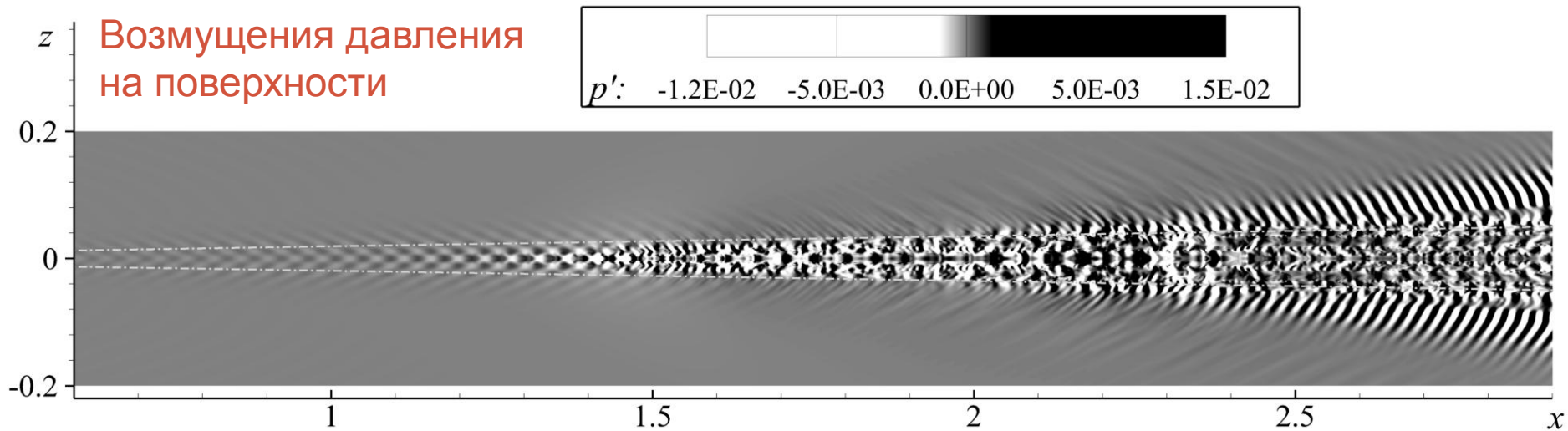
Амплитуда воздействия:

$$\varepsilon = 0.001$$

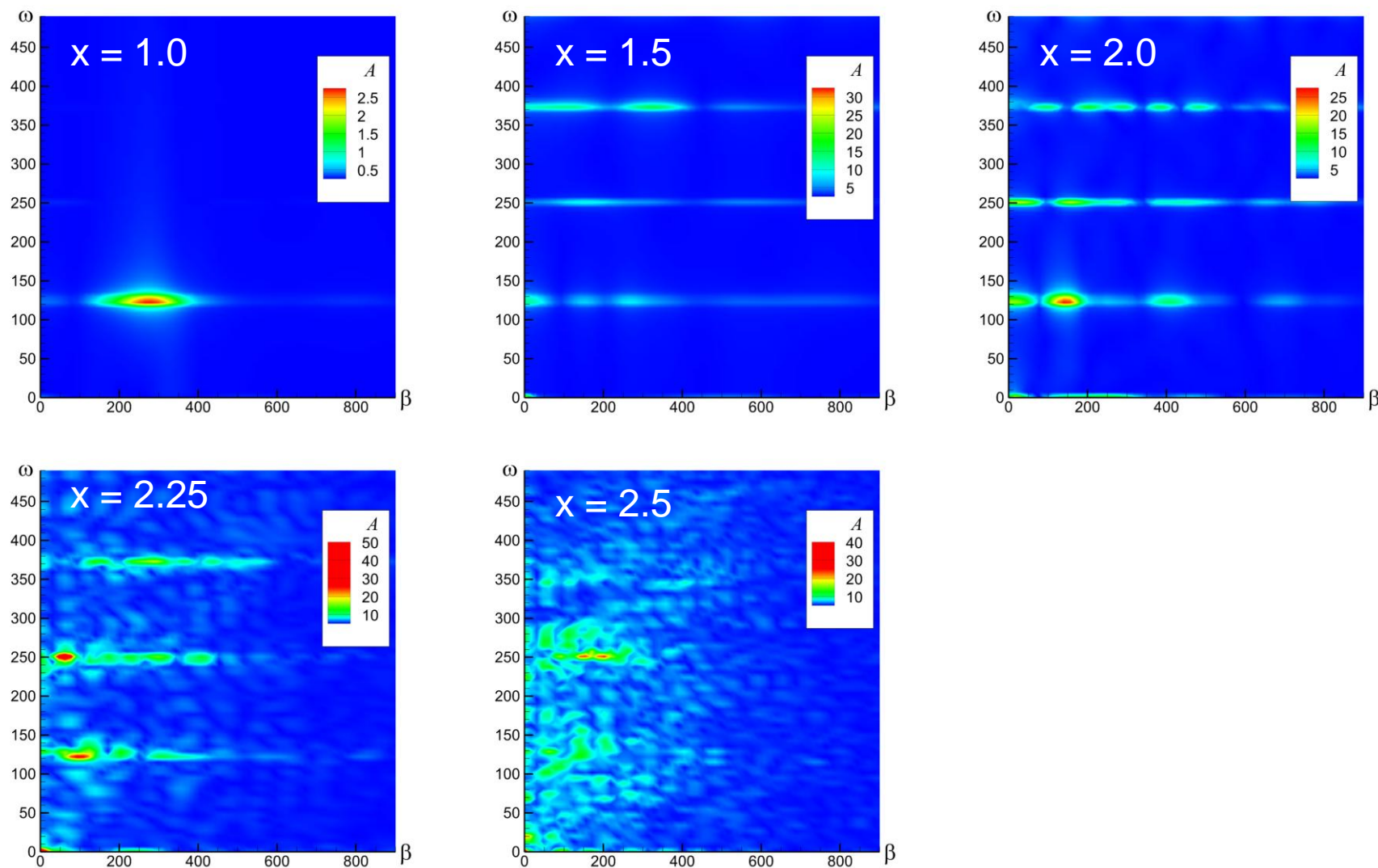
# Стационарное ламинарное обтекание



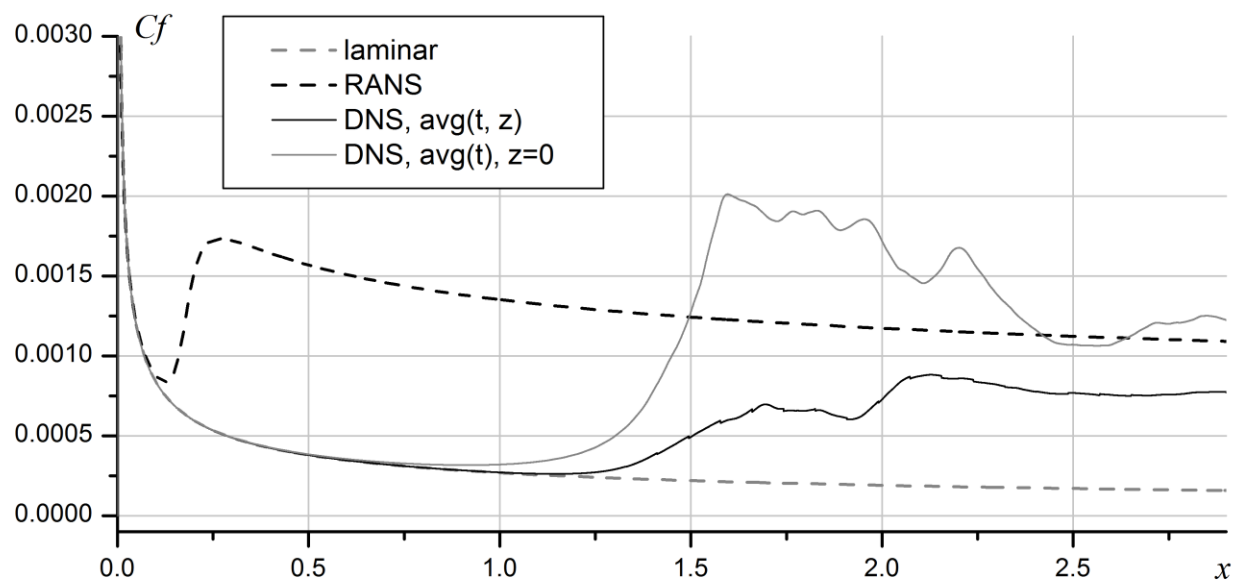
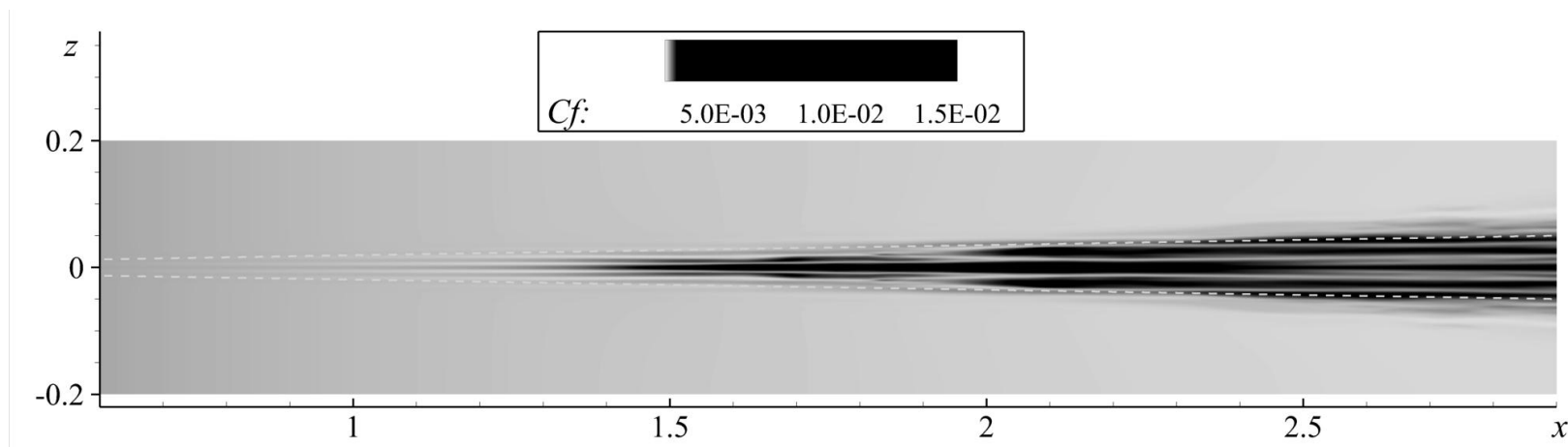
# Мгновенные поля возмущений



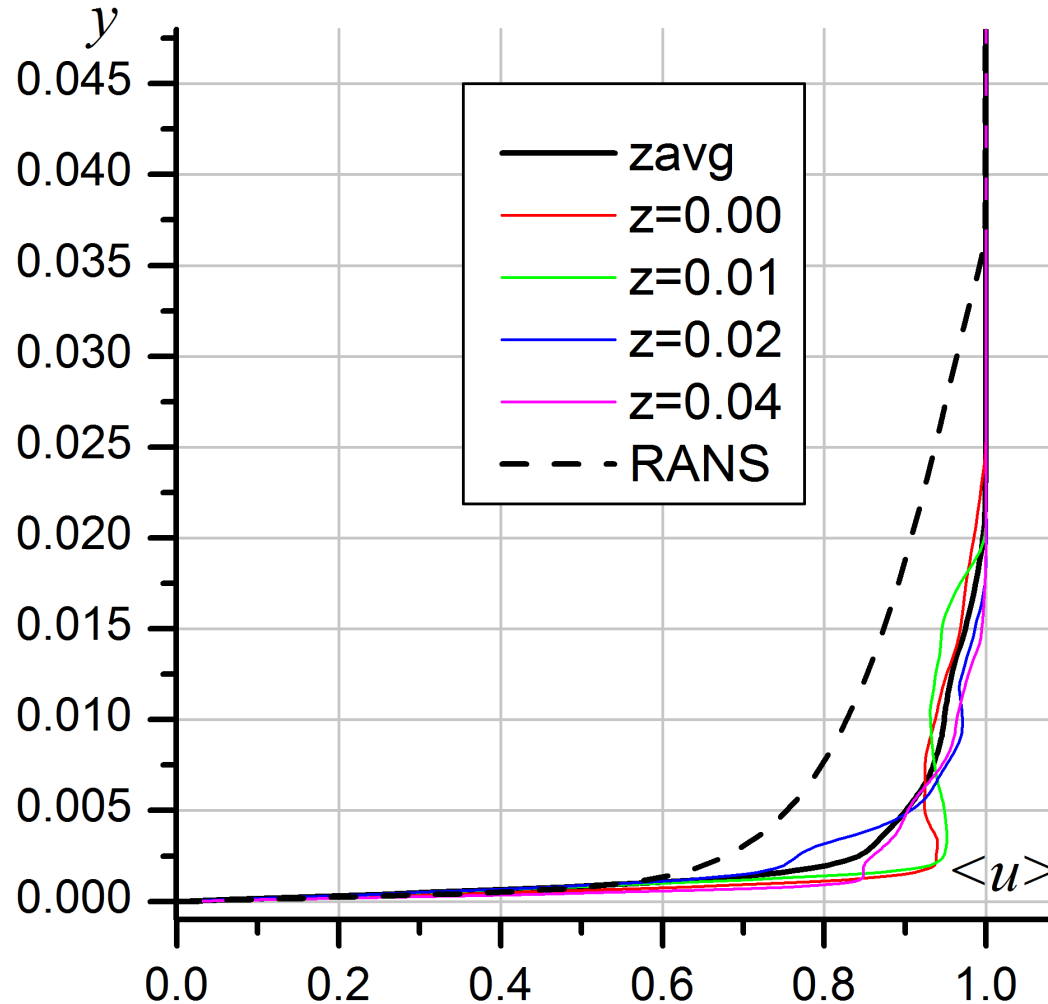
# Спектры по частоте и поперечному волновому числу при различных $x$



# Коэффициент трения на поверхности, осреднённый по времени

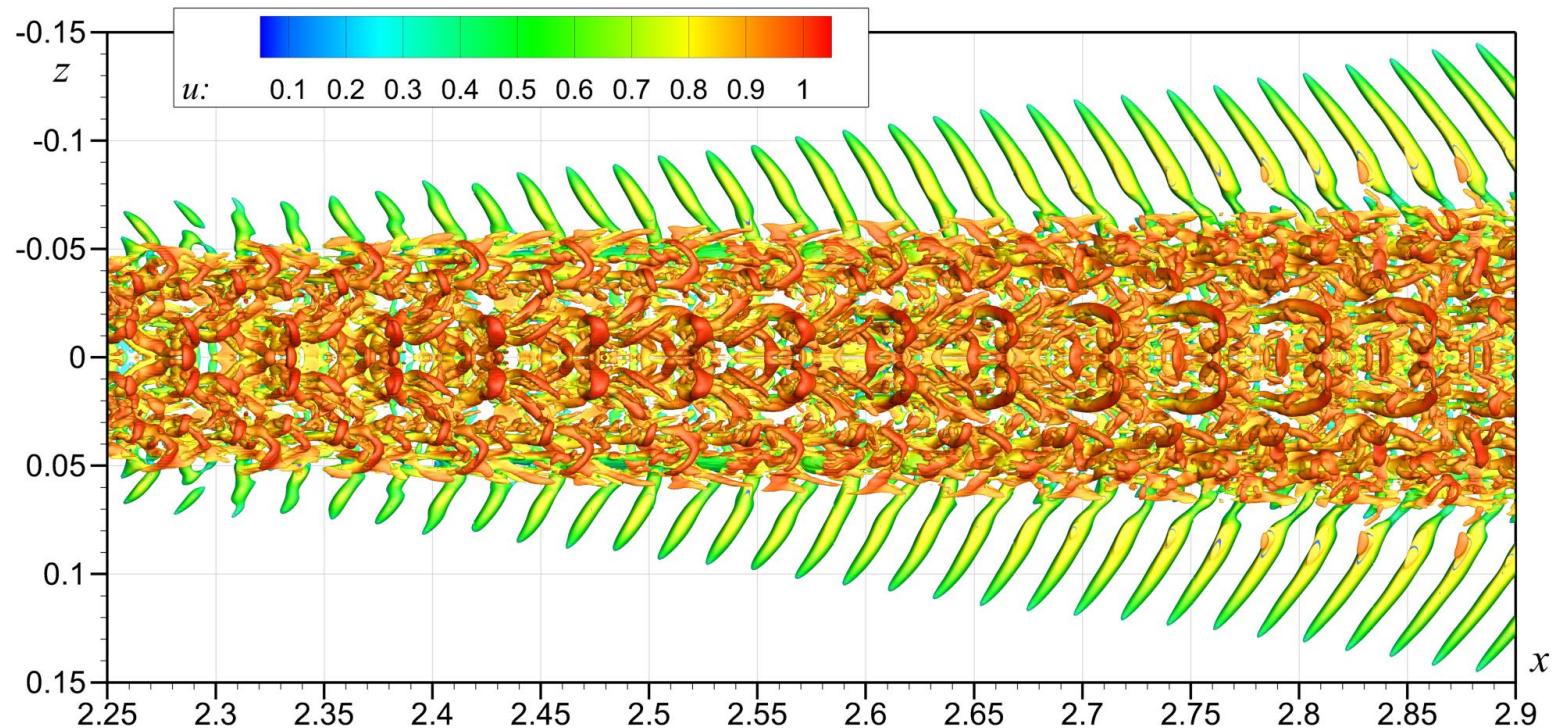
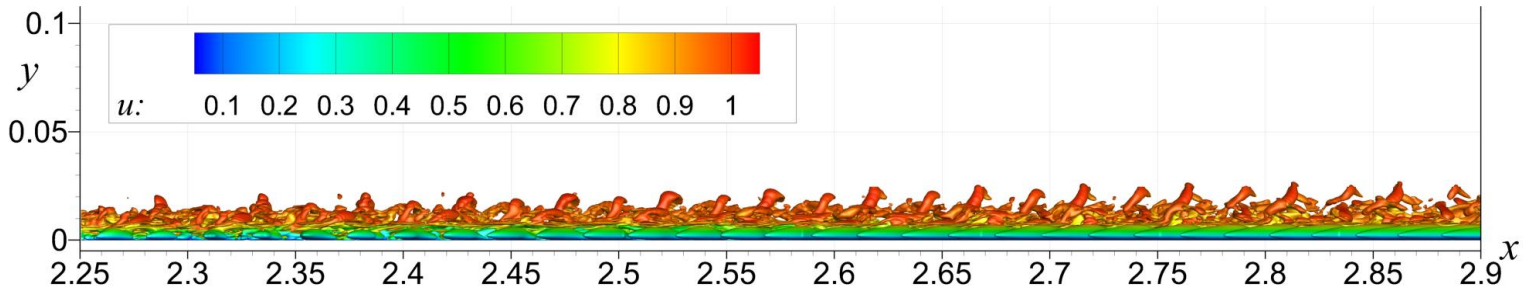


# Осреднённый профиль при $x=2.5$



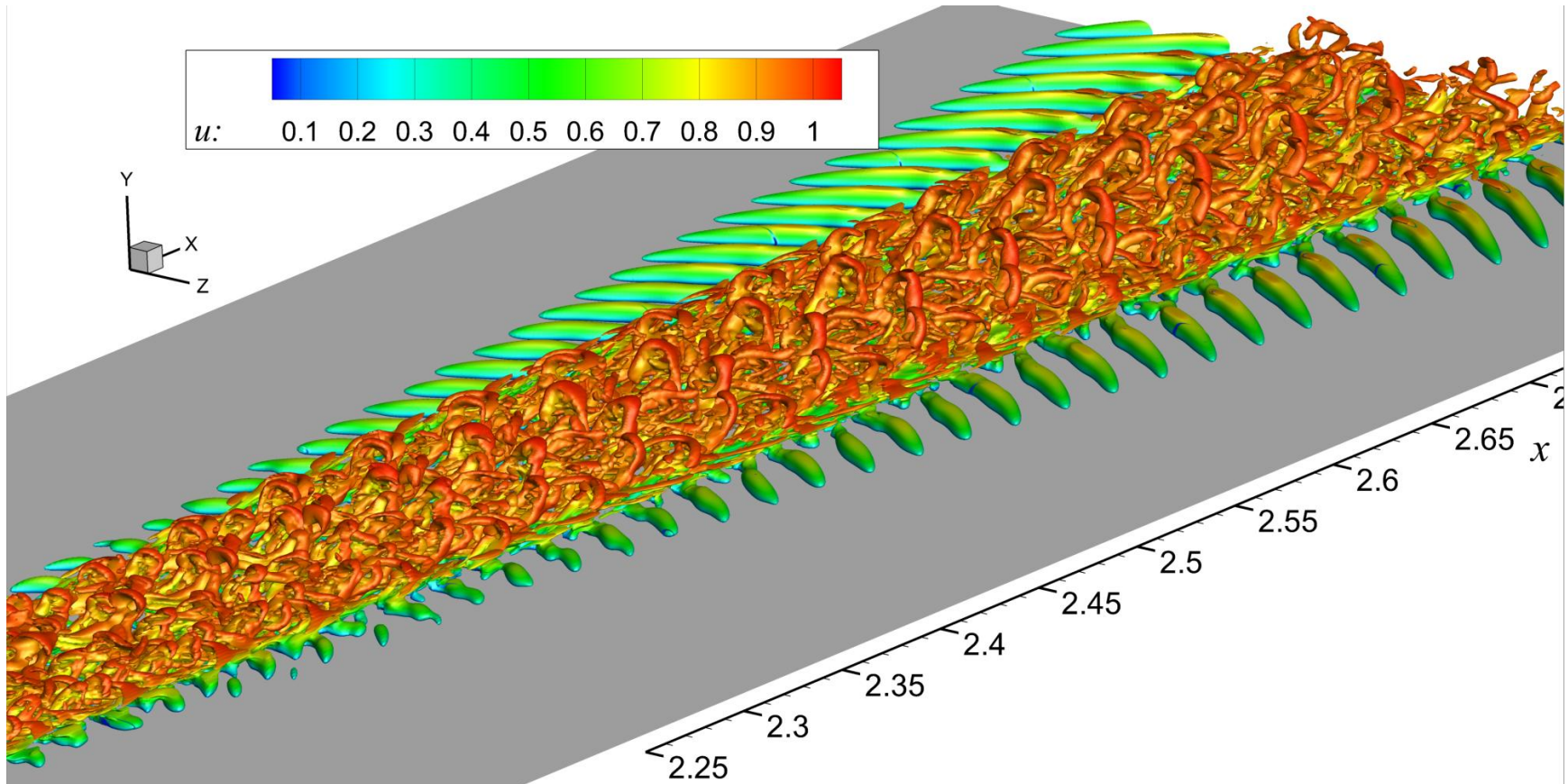


# Вихревые структуры, Q-критерий=100





# Вихревые структуры, Q-критерий=1000



# Заключение

- ❑ Применяемый численный метод позволяет моделировать процесс ламинарно-турбулентного перехода от начальной линейной стадии до конца нелинейного разрушения.
- ❑ Пакет расчётных программ HSFlow позволяет проводить эффективные распределённые вычисления на вычислительных кластерах с применением тысяч процессорных ядер

# Текущие работы

- Гибридные модели турбулентности – расчёт линии перехода на основе теории устойчивости
- Моделирование неравновесных физико-химических процессов