



# **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭФФЕКТОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ**

**А.Н. Кудрявцев, Д.В. Хотяновский**

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

## Актуальность

- Переход к турбулентности в пограничном слое на поверхности сверхзвукового летательного аппарата приводит к значительному увеличению тепловых потоков, повышению сопротивления и снижению эффективности управления.
- Одним из наиболее важных факторов, влияющих на развитие турбулентности в пограничном слое, является наличие шероховатости на поверхности.
- Шероховатость может вызывать ранний ламинарно-турбулентный переход и приводить к повышенному нагреву на сверхзвуковых скоростях полета.



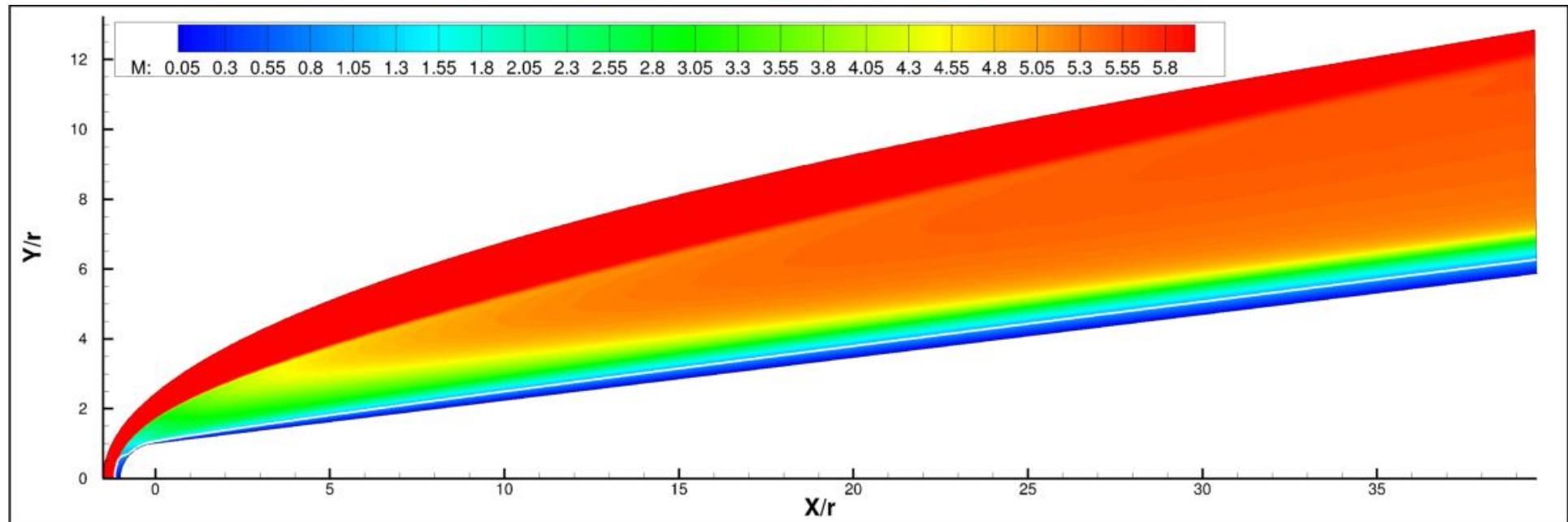
## Предыдущие исследования

- Экспериментальные работы
  - Wheaton and Schneider, AIAA J. 50, 2012.
  - Группа А.А. Маслова, текущие исследования.
- Численные работы:
  - Balakumar et al.
  - Egorov, Novikov, Fedorov, AIAA 2010-1245.
  - Choudhari et al. AIAA 2013-0081.
  - Kurz and M.J. Kloker, J. Fluid Mech 796, 2016.

**Настоящее исследование было поддержано Российским научным фондом в рамках проекта №14-11-00490**



Конечная цель: исследование влияния шероховатости на переход к турбулентности на затупленном конусе



Затупленный конус при  $M=6$ . Решение уравнений Навье-Стокса

В экспериментах шероховатость помещалась на носике конуса, в месте, где число Маха на границе пограничного слоя равнялось примерно 2.



## Постановка задачи

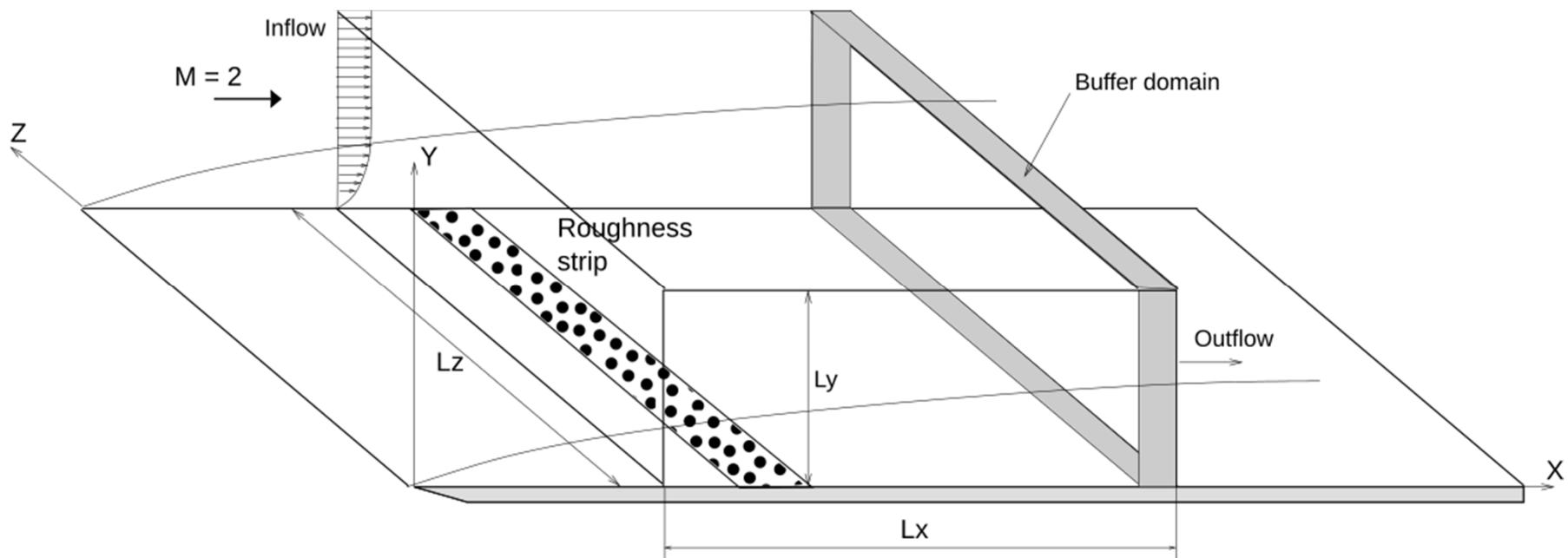


Схема вычислительной области

## Численные методы

- CFS3D код для решения уравнений Навье-Стокса сжимаемого газа:
  - WENO-5 или TVD-4 дискретизация конвективных потоков,
  - центральная дискретизация диффузионных потоков 2-го -- 4-го порядка,
  - интегрирование по времени – схема Рунге-Кутты 4-го порядка,
  - Распараллеливание MPI
- HyCFS — версия CFS3D для гибридных суперкомпьютеров
  - Nvidia CUDA для параллелизации GPU,
  - ниточная параллелизация OpenMP на вычислительном узле,
  - пересылка сообщений MPI между узлами.

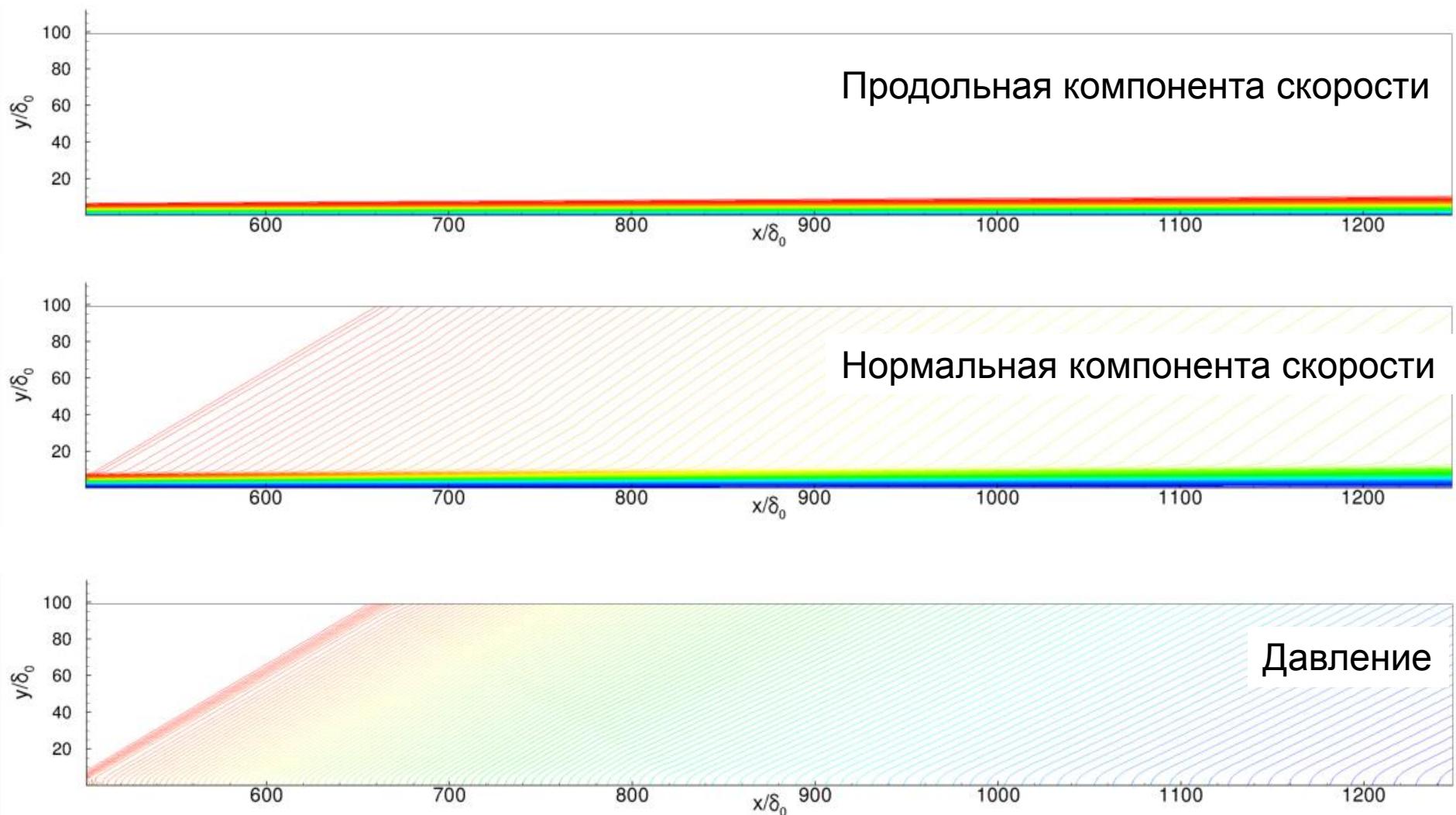


## Численные методы (продолжение)

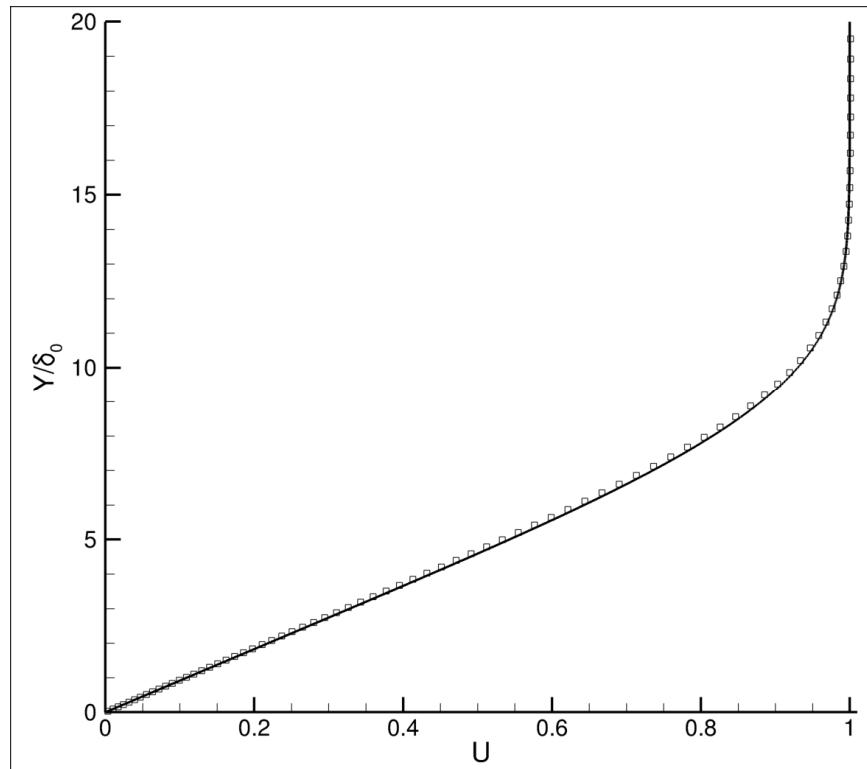
- Границные условия:
  - автомодельные профили пограничного слоя на входной границе,
  - мягкие или неотражающие граничные условия на верхней и выходной границах,
  - условия периодичности по размаху,
  - плоская пластина: условия прилипания, нулевой градиент давления, постоянная температура, соответствующая адиабатическому течению,
  - буферная реламинаризационная зона вблизи выходной границы.
- Вычислительная область:  $L_x = 1000 \delta$ ,  $L_y = 75 \delta$ ,  $L_z = 100 \delta$ .
- Структурированная сетка, согласованная с поверхностью:  
 $N_x = 1280$ ,  $N_y = 200$ ,  $N_z = 128$ . Общее число ячеек сетки 32.7 млн.
- Вычисления проводятся на 64 ядрах ЦП с кодом CFS3D или 9 Nvidia GPU с кодом HyCFS.



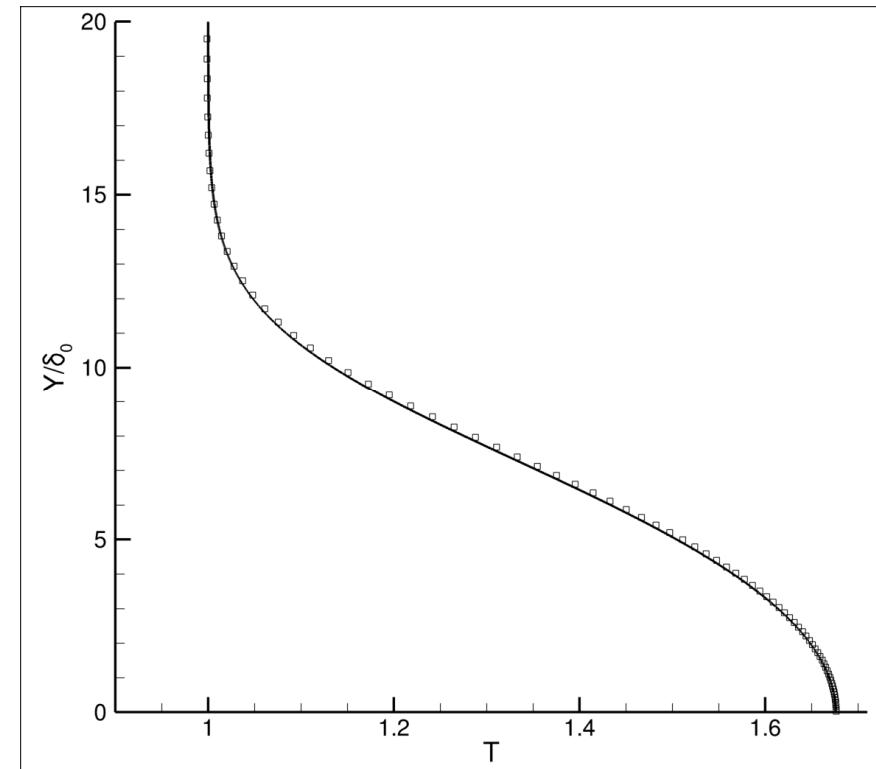
## Ламинарный пограничный слой, $M=2$ , $Re_{\delta_0}=500$



## Профили ламинарного пограничного слоя. $M=2$ , $Re_{\delta_0}=500$ .



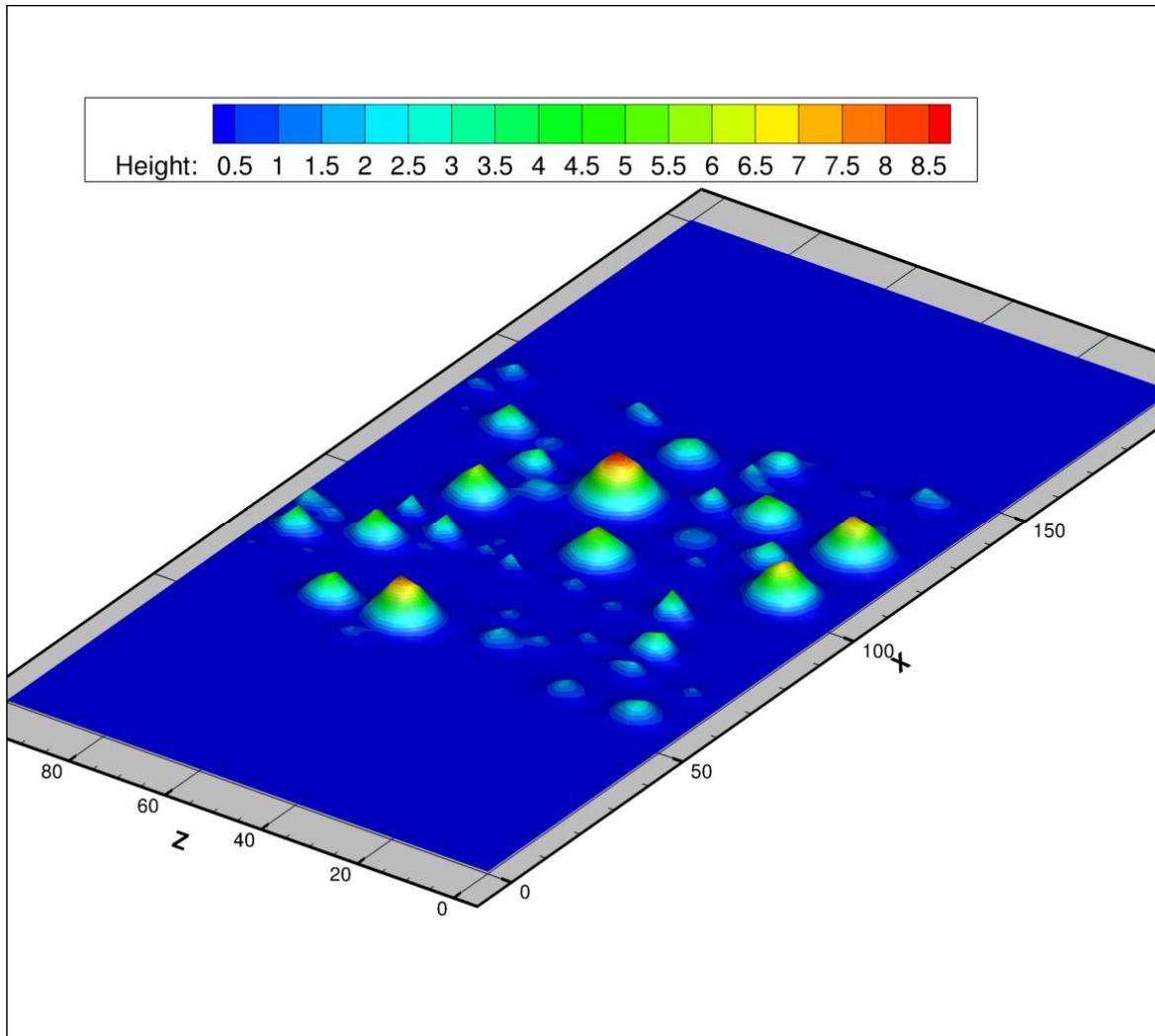
Продольная скорость



Температура

Сплошные кривые соответствуют автомодельному решению, символы – численное решение

## Шероховатость поверхности



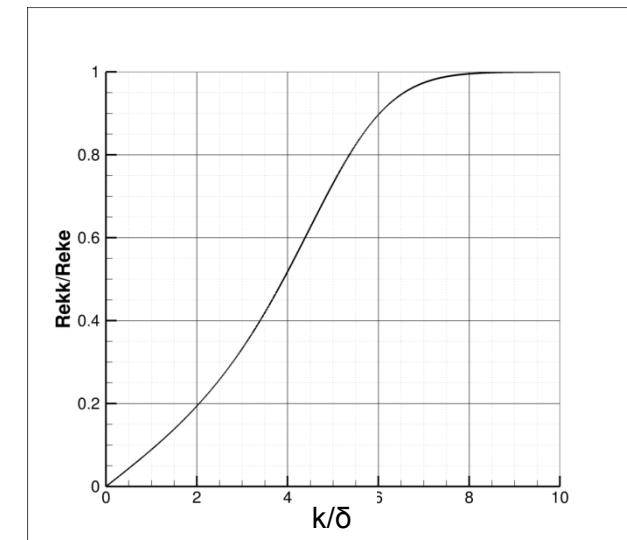
$$k = H \cos^2(\pi r / 2R)$$

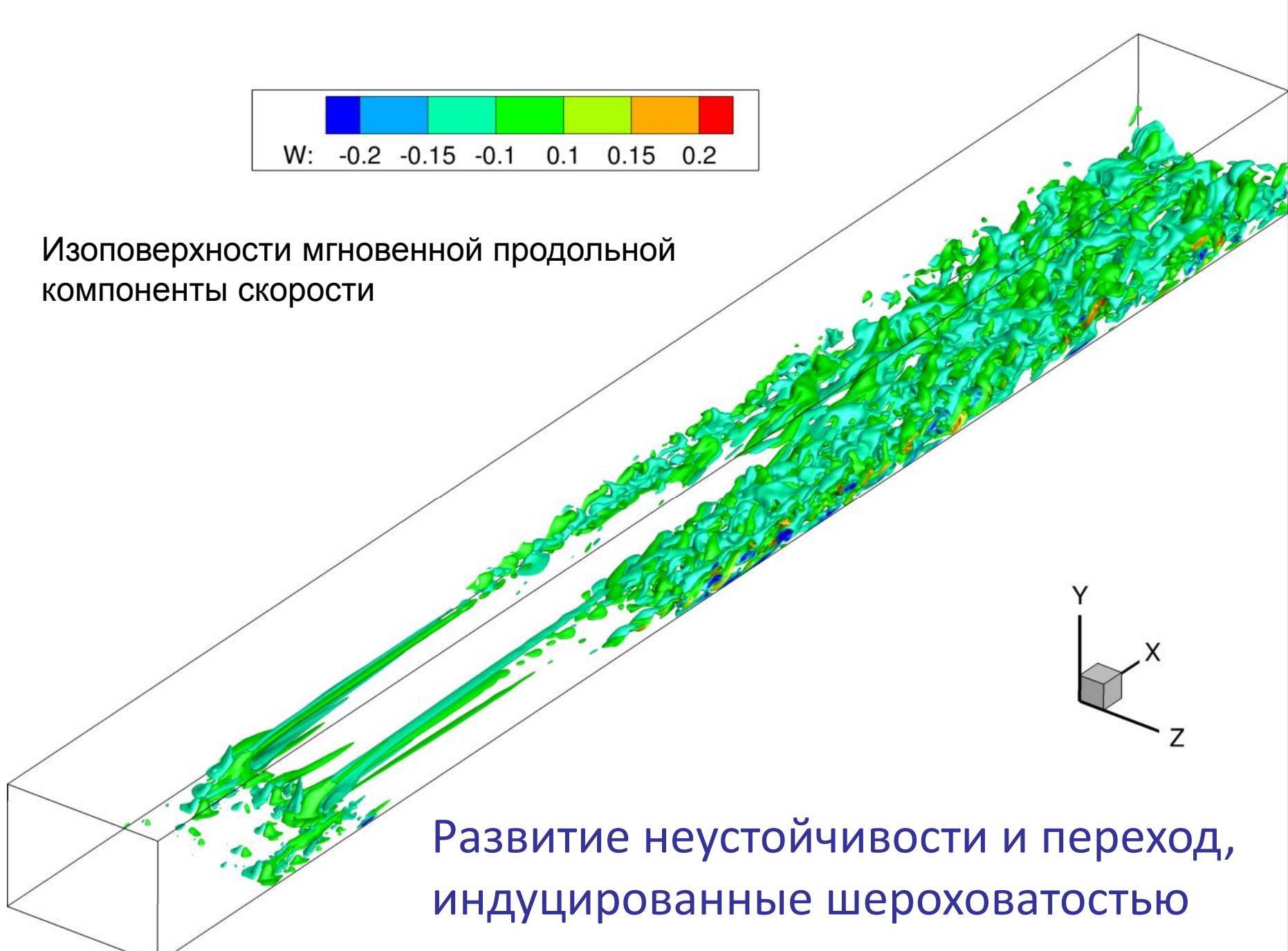
Случайное распределение

$$\delta < H < 10 \delta$$

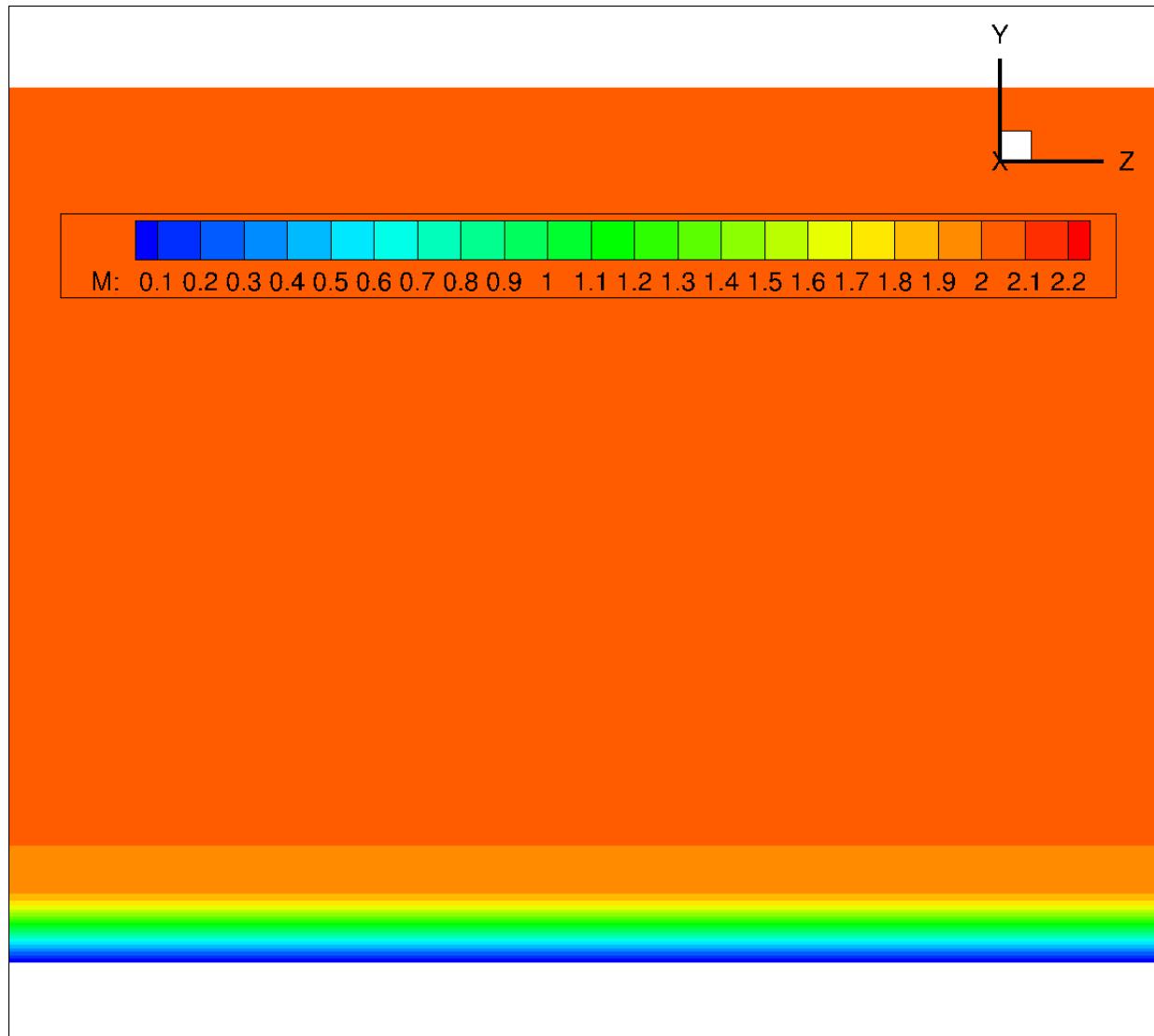
$$\delta < R < 10 \delta$$

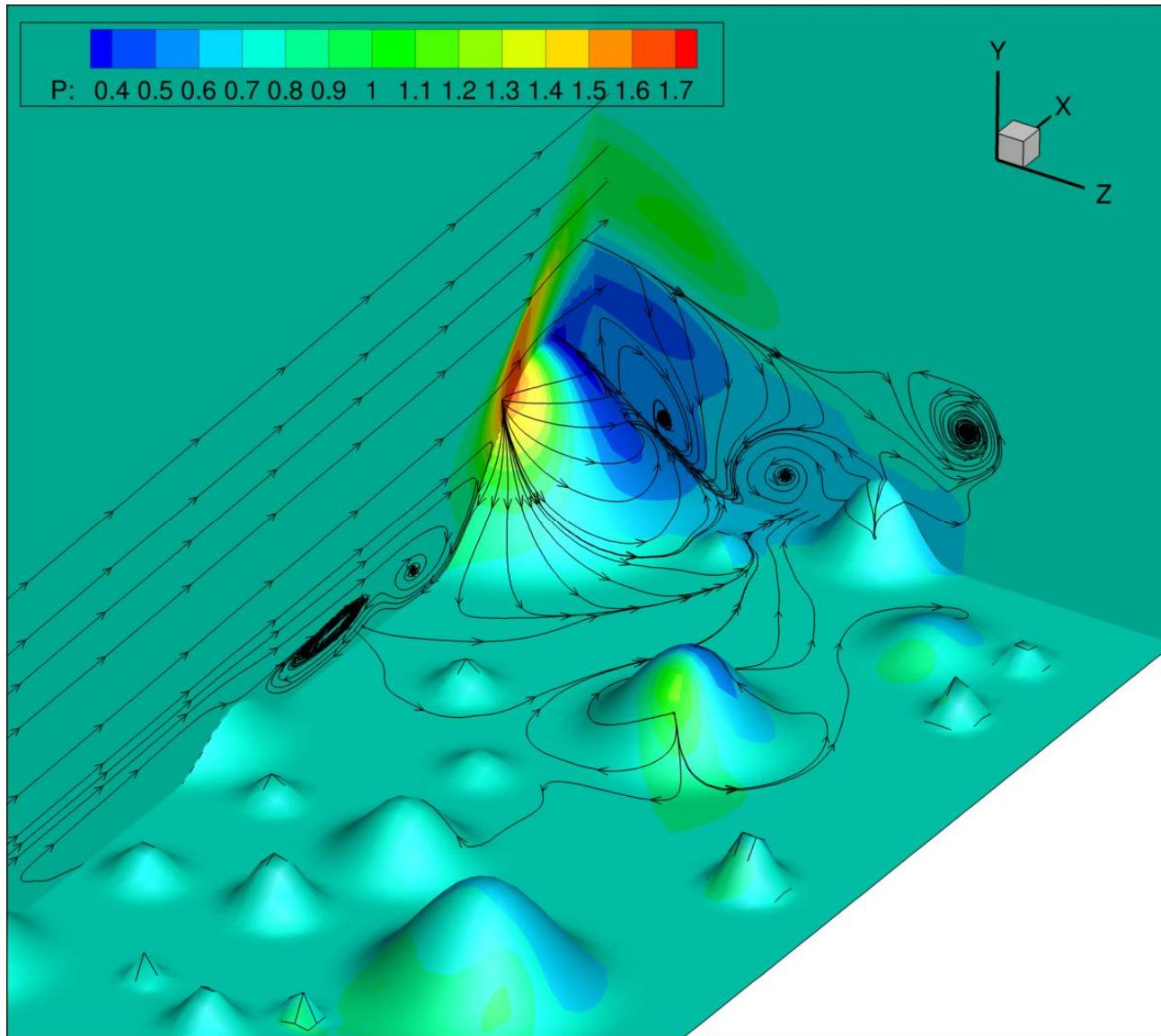
$$Re_{kk} = U_k k / \nu_k = 40 \dots 500$$





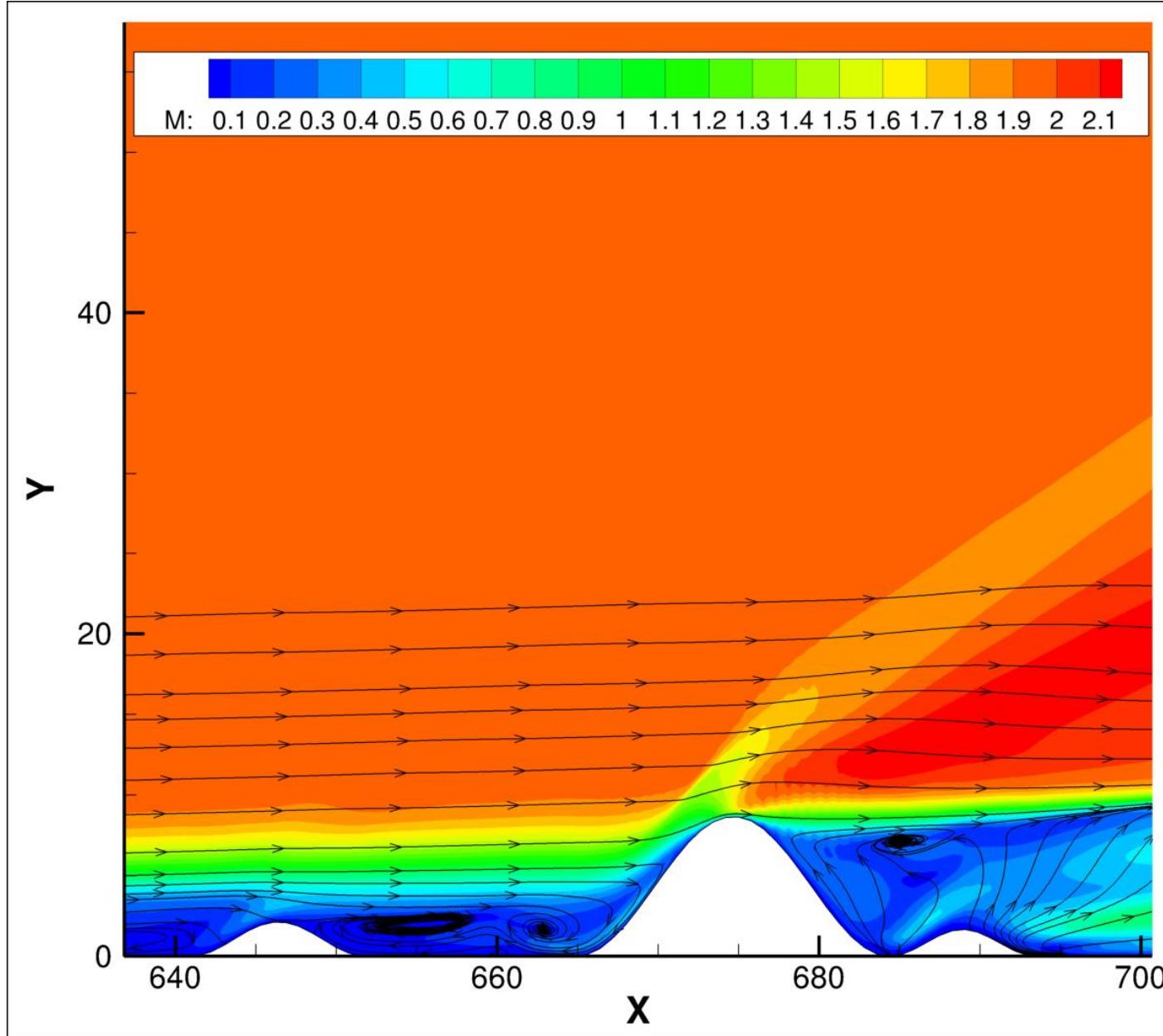
# Поле чисел Маха в поперечных срезах





Течение вблизи  
большого  
элемента  
шероховатости

Линии тока и поле  
давления в трех  
перпендикулярных  
плоскостях



Течение  
вблизи  
большого  
элемента  
шероховатости

Линии тока и поле  
числа Маха в  
плоскости x, y

## ВЫВОДЫ

- Проведено прямое численное моделирование эффектов шероховатости поверхности в сверхзвуковом пограничном слое при  $M=2$ .
- Распределенная шероховатость вызывает искажение среднего течения и нестационарные процессы в следе за элементами шероховатости.
- Из-за индуцированных градиентов скорости в следе образуются продольные вихревые структуры.
- Эволюция вихревых структур вниз по потоку, по-видимому, сопровождается развитием неустойчивости сдвиговых слоев, что приводит к появлению нестационарных трехмерных пульсаций.
- Наиболее значительные эффекты вносятся элементами шероховатости с высотой  $k > 3 \delta$ , что соответствует  $Re_{kk} > 500$ .
- Ниже по потоку, развитие пульсаций в продольных вихревых структурах и взаимодействие соседних вихрей приводит к ламинарно-турбулентному переходу.

