



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

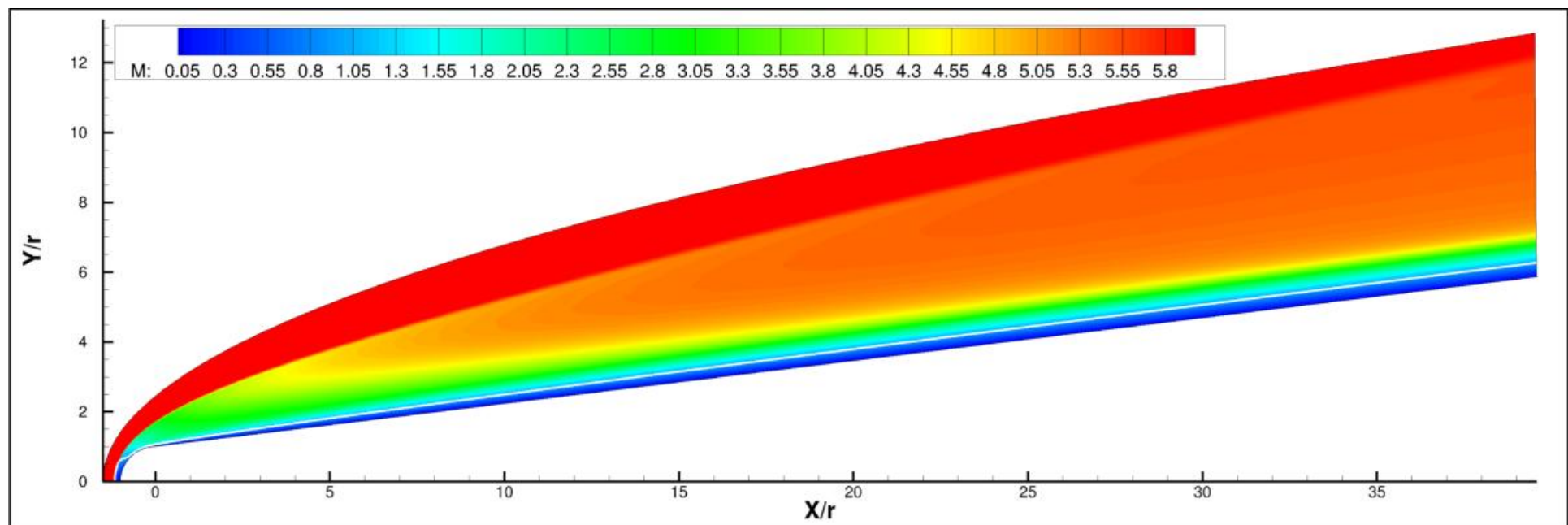
- Переход к турбулентности в пограничном слое на поверхности сверхзвукового летательного аппарата приводит к значительному увеличению тепловых потоков, повышению сопротивления и снижению эффективности управления.
- Одним из наиболее важных факторов, влияющих на развитие турбулентности в пограничном слое, 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

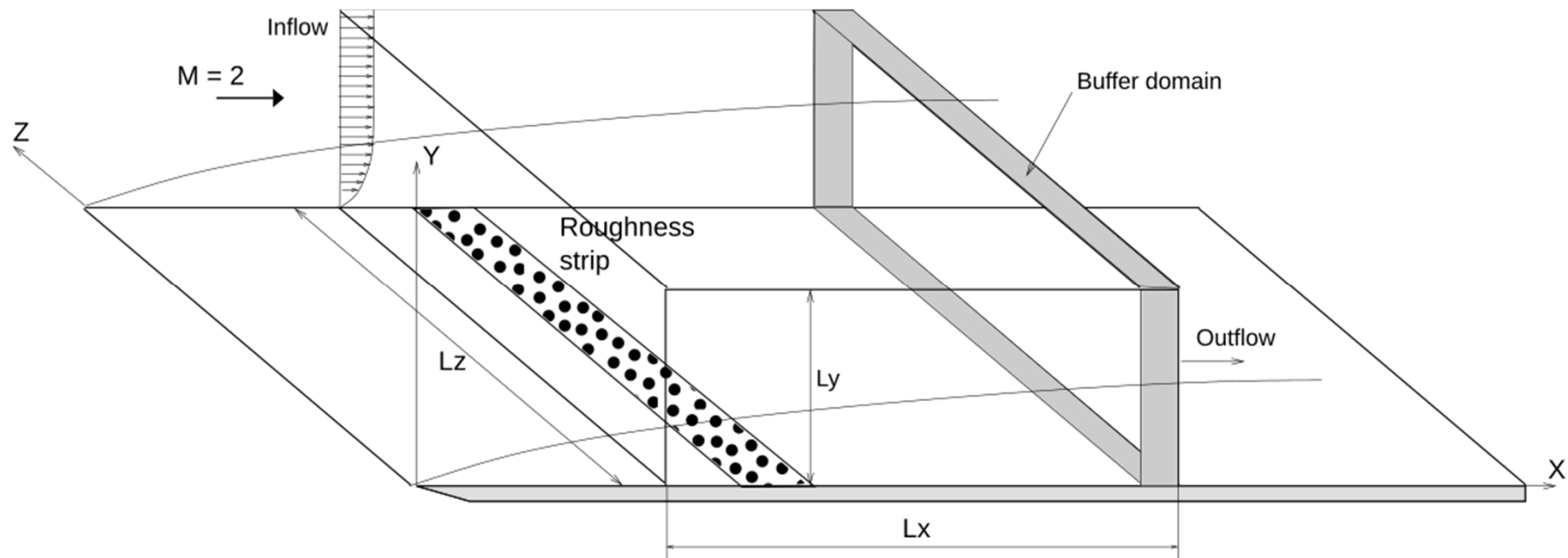


Схема вычислительной области

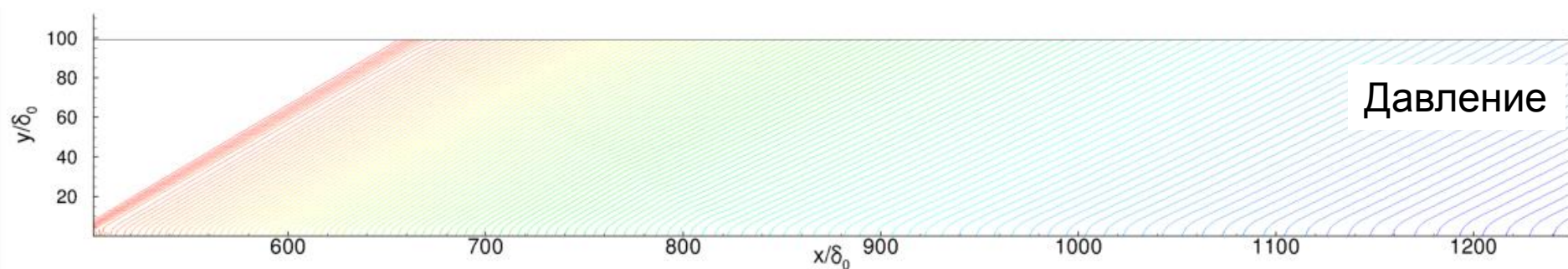
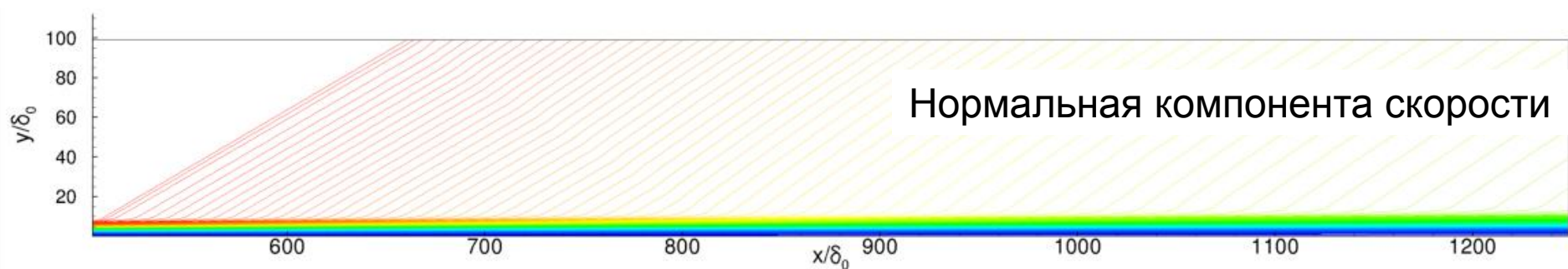
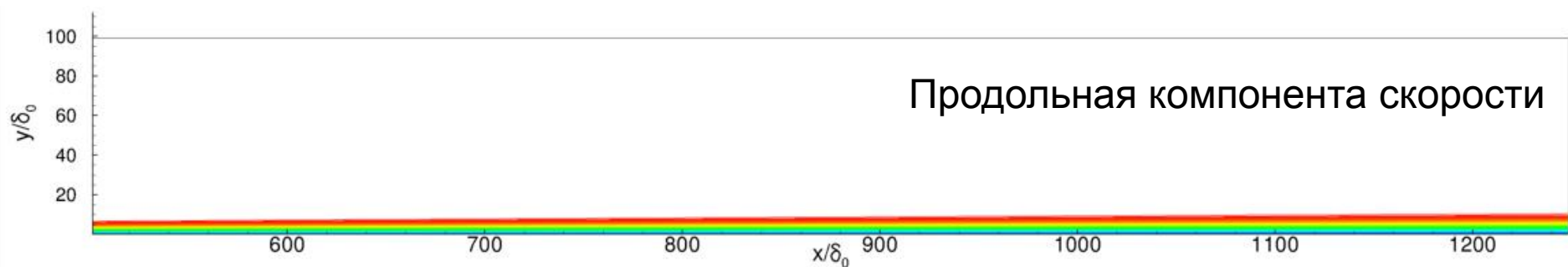
Численные методы

- 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.

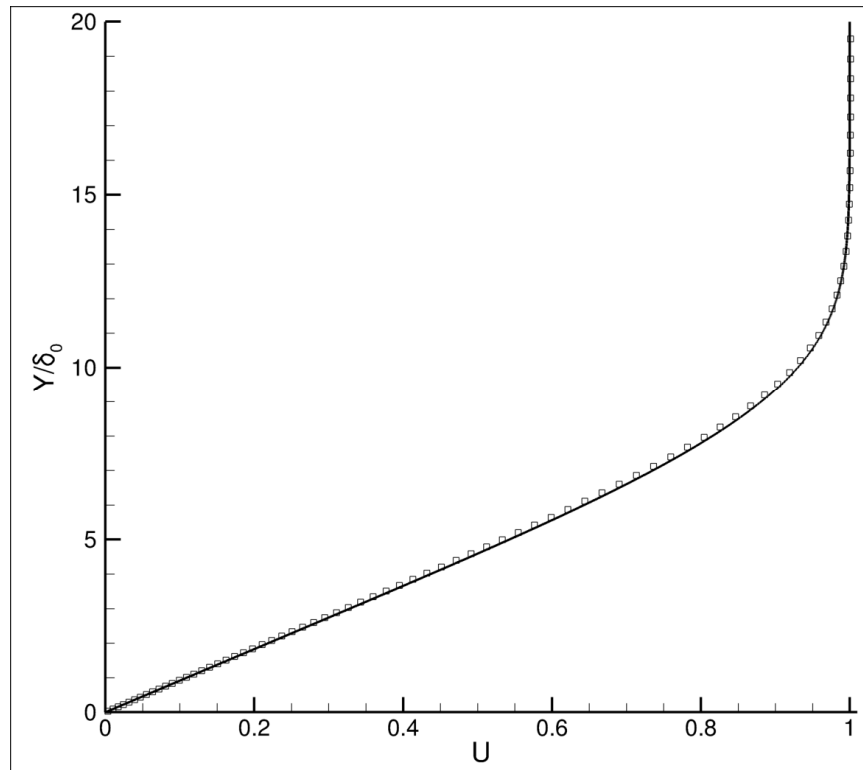
Численные методы (продолжение)

- Граничные 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.

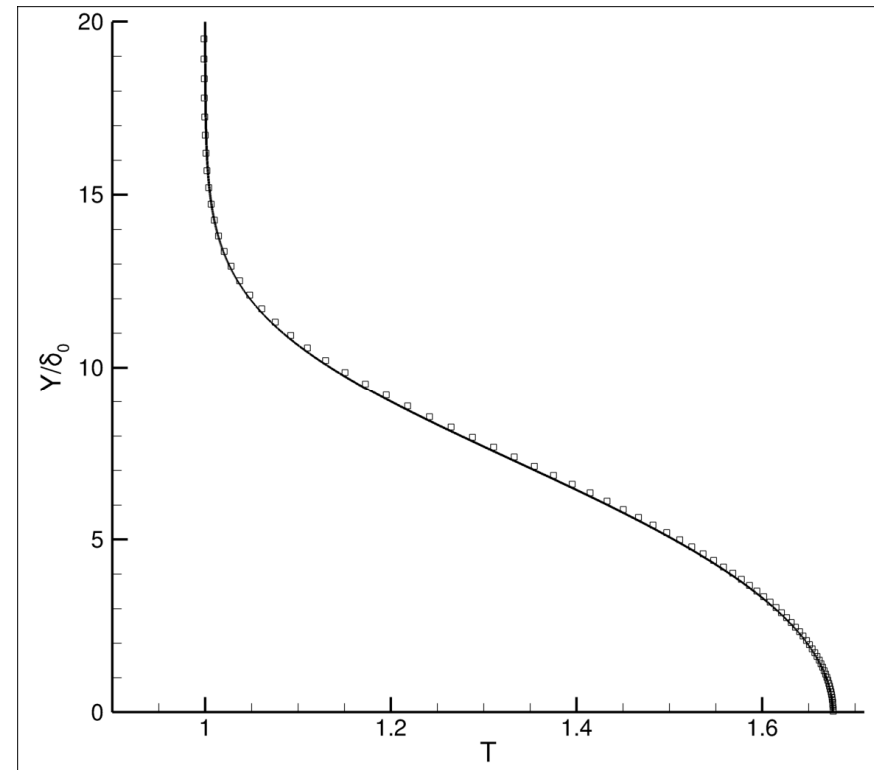
Ламинарный пограничный слой, $M=2$, $Re_{\delta_0}=500$



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



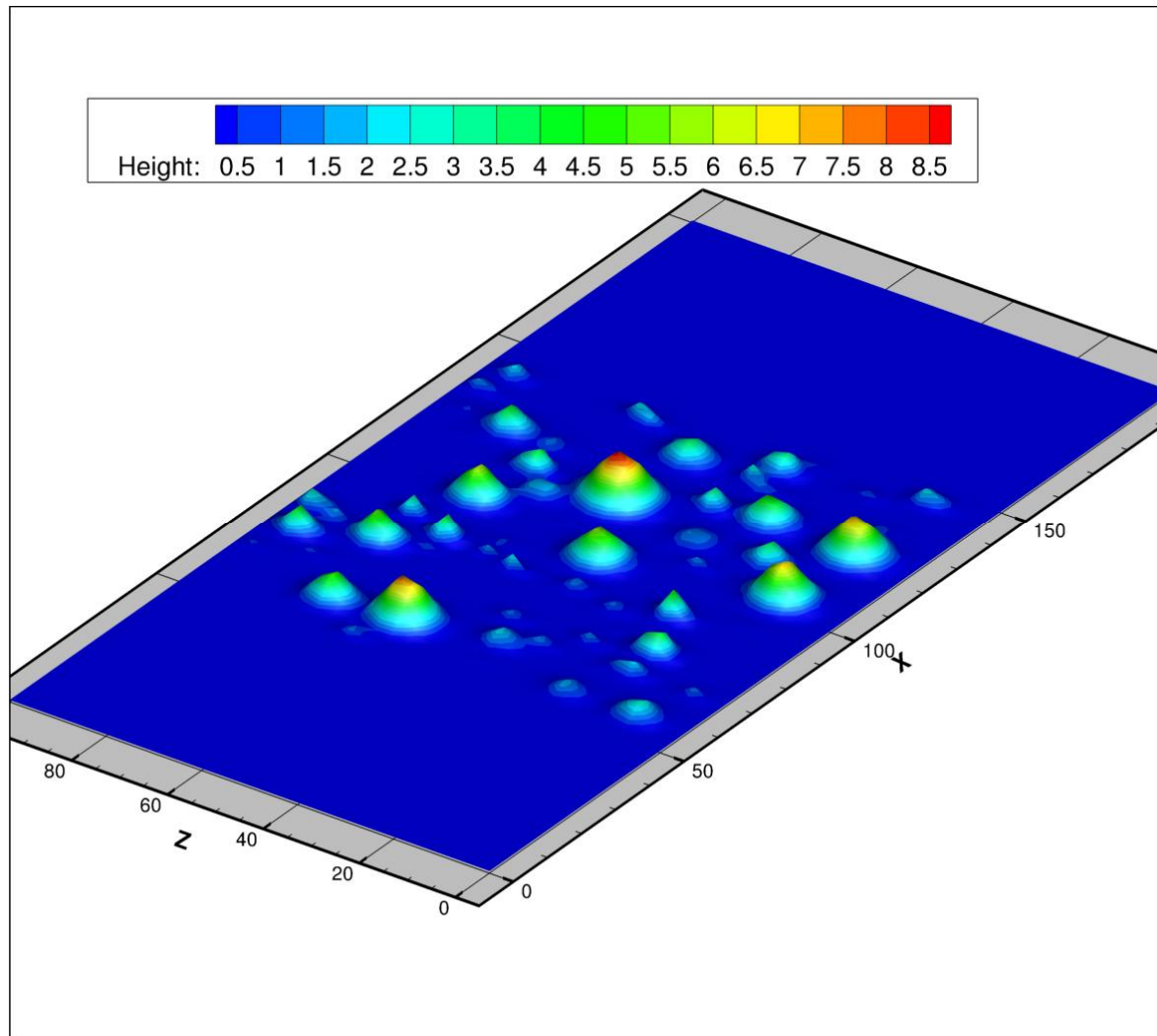
Продольная скорость



Температура

Сплошные кривые соответствуют автомодельному решению, символы – численное решение

Шероховатость поверхности



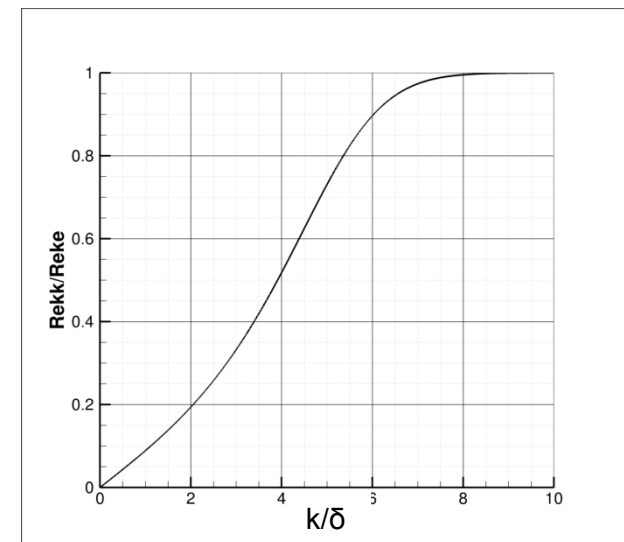
$$k = H \cos^2(\pi r / 2R)$$

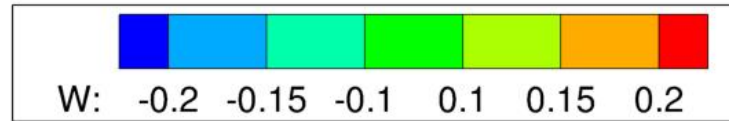
Случайное распределение

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

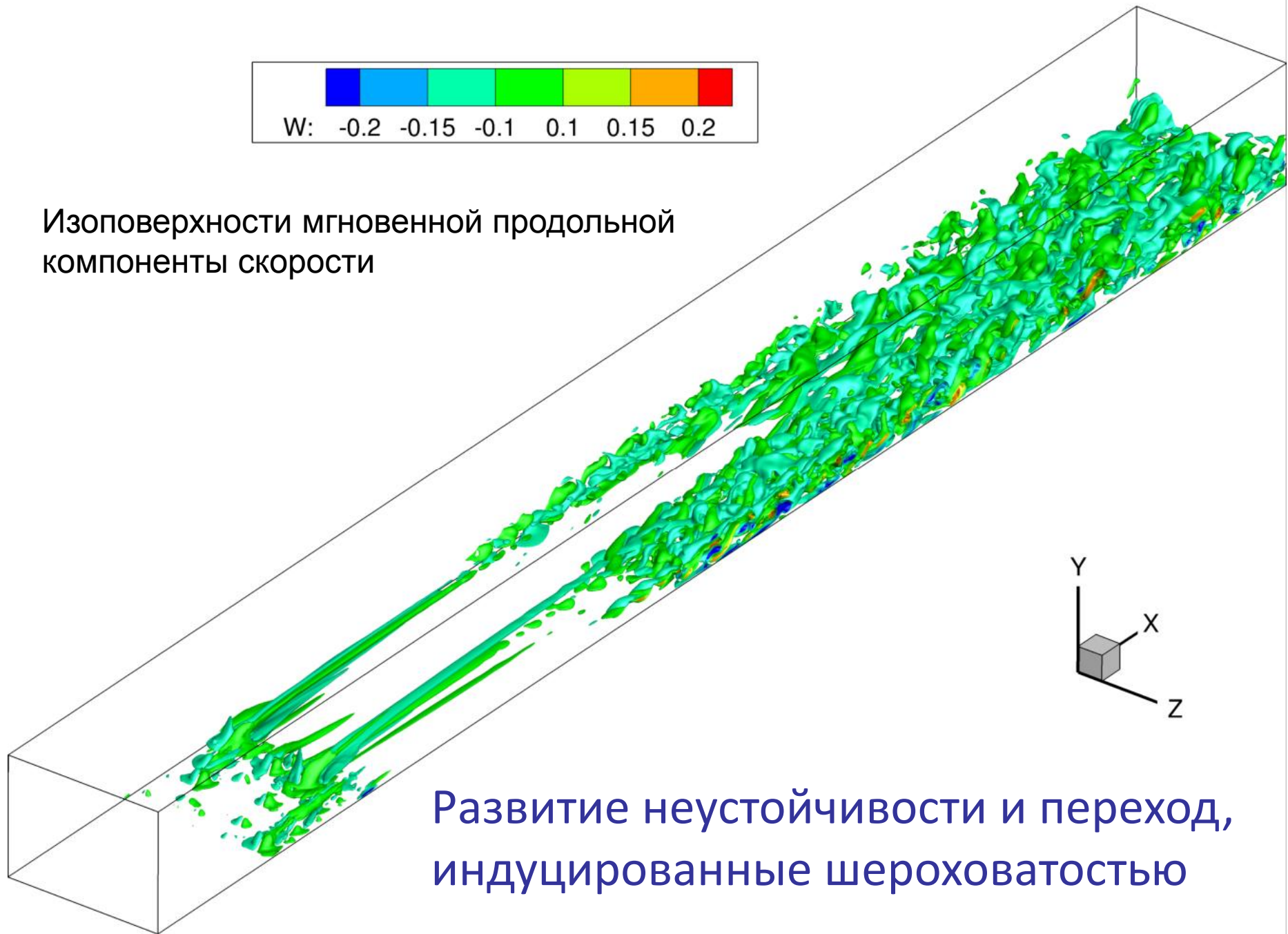
$$\delta < R < 10 \delta$$

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



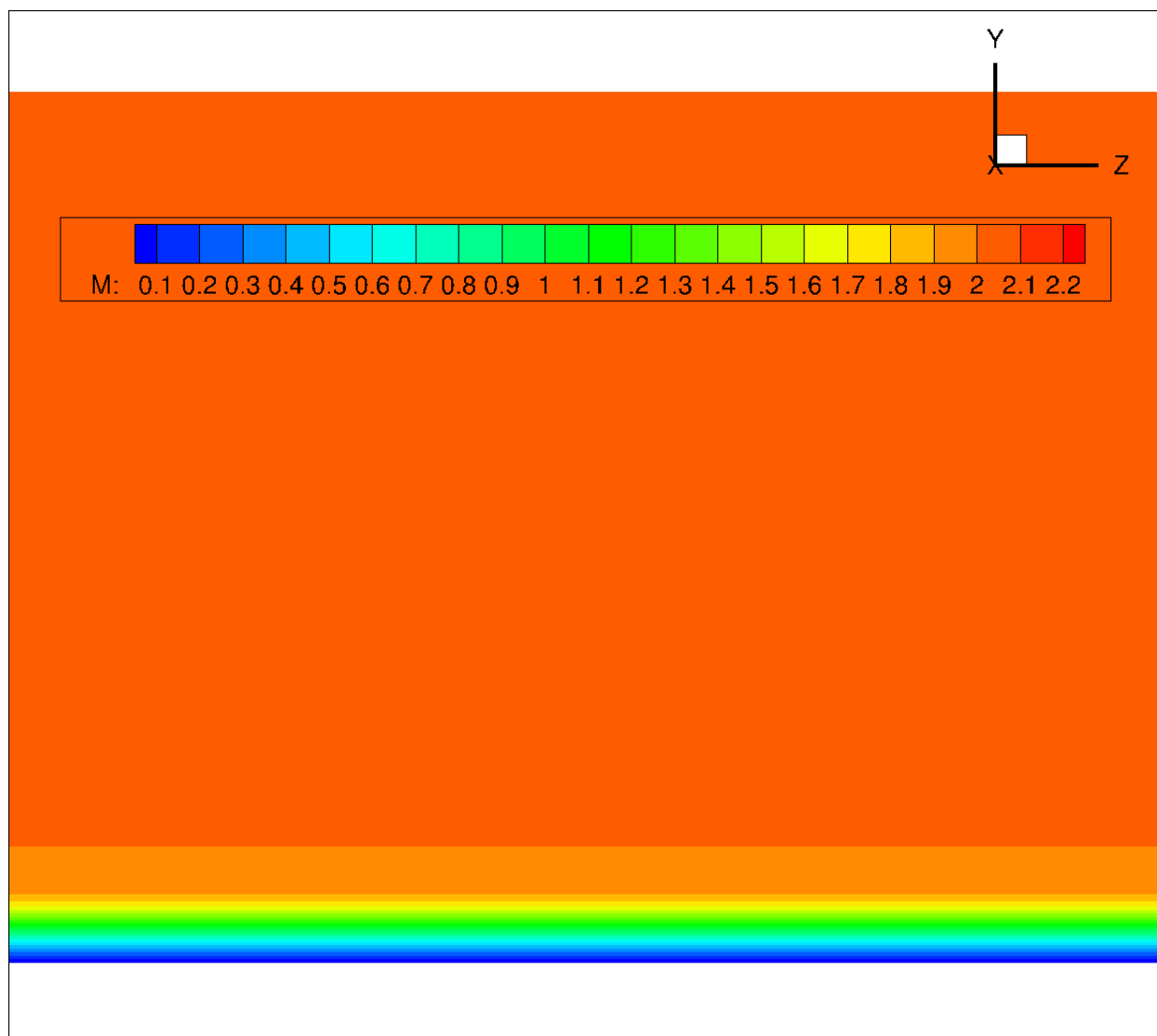


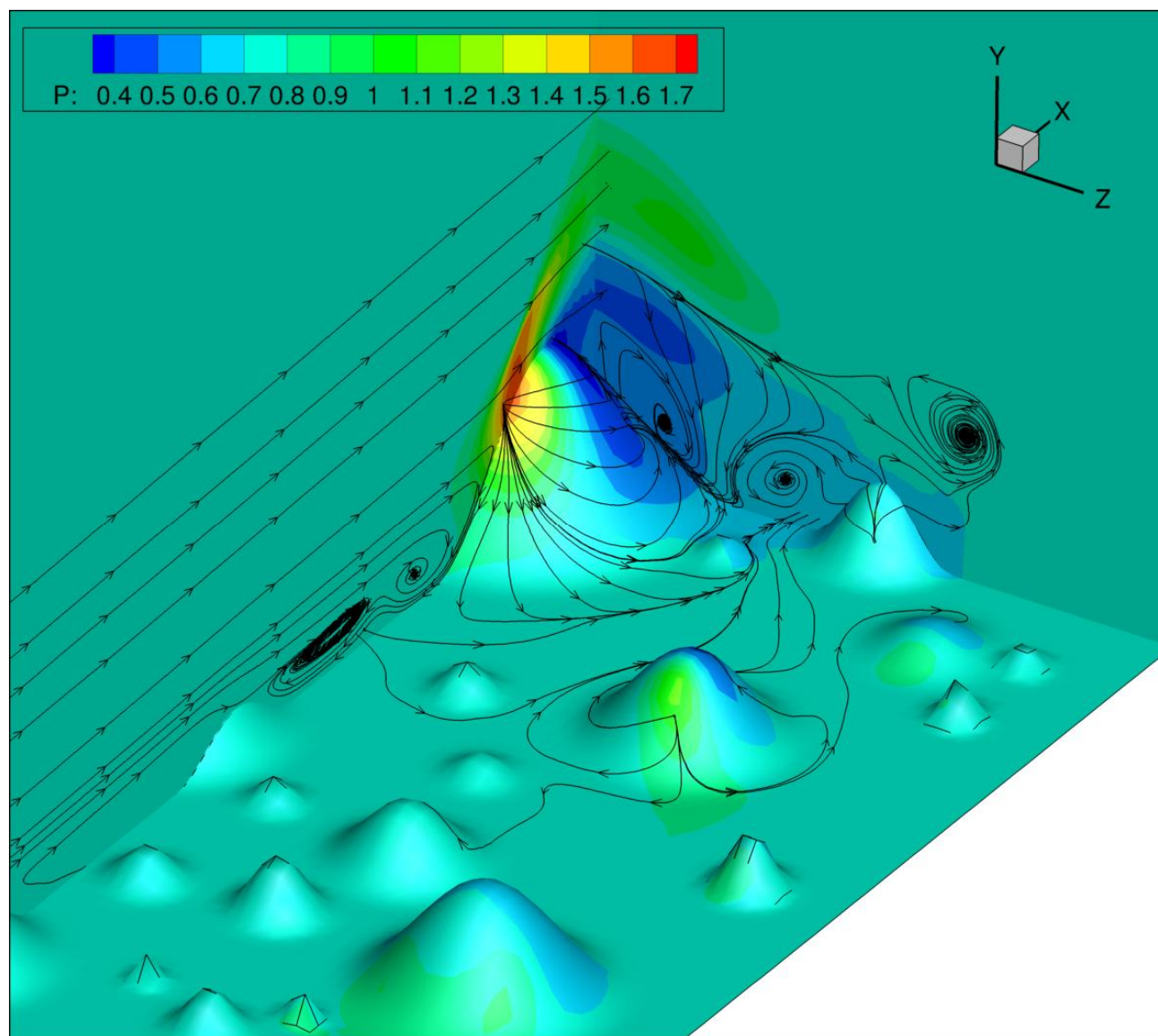
Изоповерхности мгновенной продольной
компоненты скорости



Развитие неустойчивости и переход,
индуцированные шероховатостью

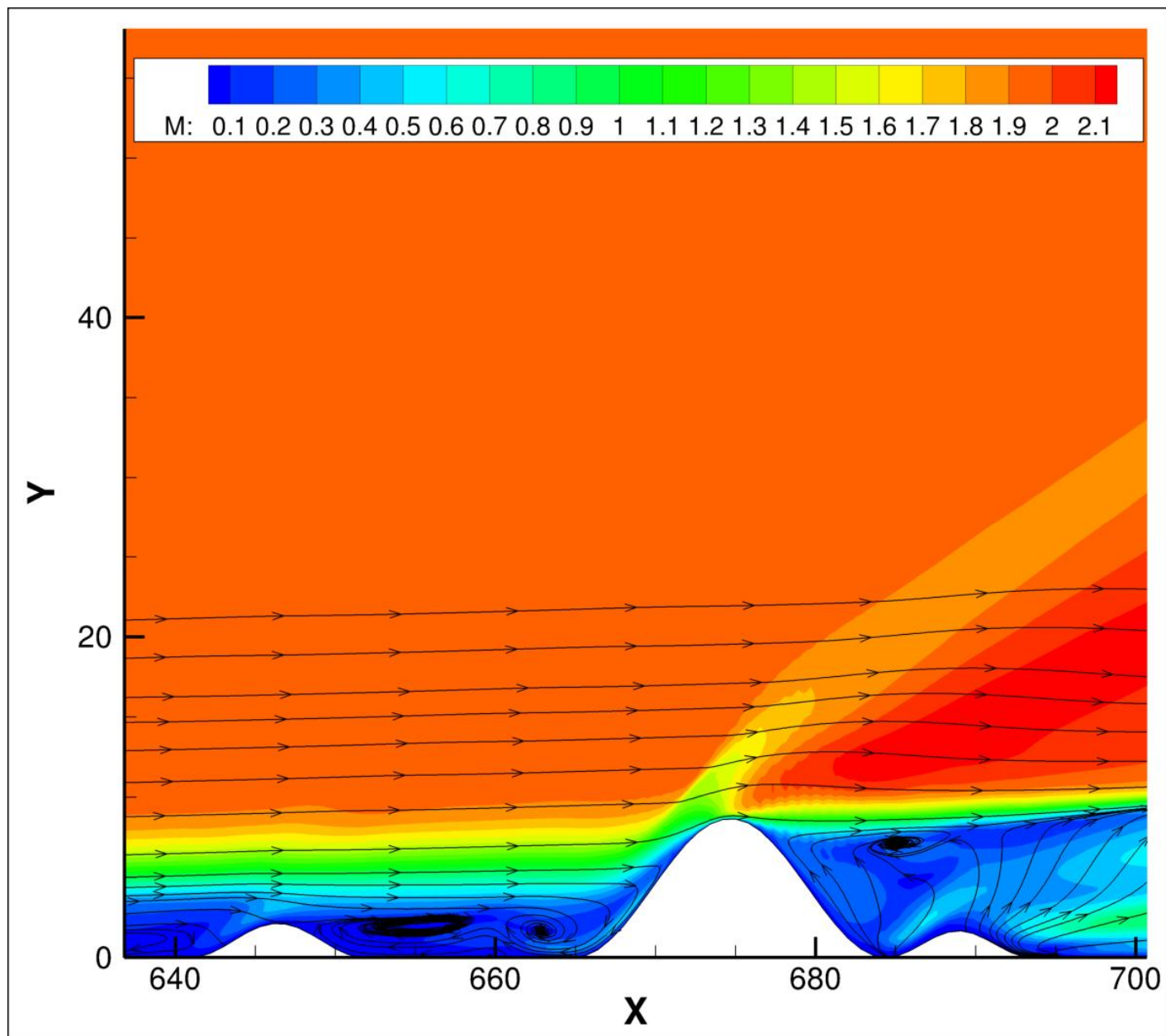
Поле чисел Маха в поперечных срезях





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.