

VII ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ  
ЭКСПЕРИМЕНТ  
В АЭРОАКУСТИКЕ



17-22 сентября 2018 года, г. Светлогорск Калининградской области

# Численное исследование развития возмущений, генерируемых элементами шероховатости, при сверхзвуковом обтекании затупленного конуса

**А.Н. Кудрявцев, Д.В. Хотяновский**



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

## Мотивация

- Переход к турбулентности в пограничном слое на поверхности сверхзвукового летательного аппарата приводит к значительному увеличению трения и тепловых потоков, уменьшению эффективности использования силовой установки и систем управления.
- Одним из наиболее важных факторов, влияющих на возникновение и развитие турбулентности в пограничном слое, является шероховатость поверхности летательного аппарата.
- При сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях полета шероховатость может легко инициировать ламинарно-турбулентный переход и увеличить тепловые нагрузки на аппарат до критического уровня.

## Предыдущие исследования

- Экспериментальные работы:
  - Wheaton and Schneider, AIAA J. 50, 2012.
  - Работы группы А.А. Маслова, продолжающийся проект.
- Численные работы по распределенной шероховатости:
  - Balakumar et al., несколько публикаций, в основном двумерные расчеты.
  - Egorov, Novikov, Fedorov, AIAA 2010-1245.
  - Choudhari et al. AIAA 2013–0081.
  - Kurz and M.J. Kloker, J. Fluid Mech 796, 2016.

## Численный подход

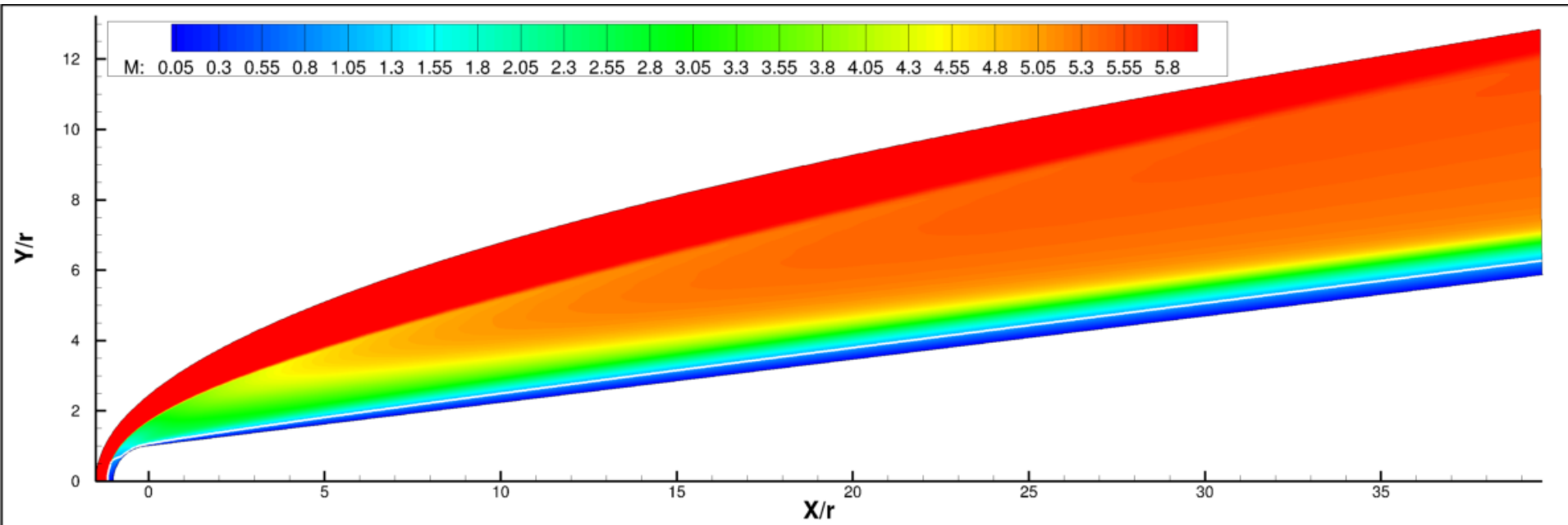
- Расчетный код CFS3D для решения сжимаемых уравнений Навье-Стокса:
  - Конечноразностные WENO-5 или TVD-4 схемы сквозного счета для вычисления конвективных потоков
  - Аппроксимация диффузионных потоков центральными разностями 2-ого или 4-ого порядка
  - Интегрирование по времени с помощью схемы Рунге-Кутты-Гилла 4-го порядка
  - MPI параллелизация
- Расчетный код HyCFS — версия CFS3D для гибридных суперкомпьютеров
  - Nvidia CUDA для GPU параллелизма
  - OpenMP нити в пределах вычислительного узла
  - MPI коммуникации между узлами

## Постановка задачи

- Моделируется влияние одиночной и распределенной шероховатости на среднее течение и генерацию возмущений в сверхзвуковом пограничном на сферически затупленном конусе. Параметры течения и геометрия модели соответствуют экспериментам *Bountin et al. Thermophysics and Aeromechanics* **23**, 629–638 (2016).
- Модель представляет собой круговой конус с полууглом раствора  $7^\circ$  и затупленным по сфере носиком радиусом  $R = 2$  мм. Длина конуса  $225 R$ . Параметры течения  $M = 5.95$ ,  $T_0 = 412.9$  К,  $Re_1 = 37.8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , соответствующее число Рейнольдса по радиусу затупления  $Re = 75.6 \cdot 10^3$ . Температура поверхности модели  $T_w = 293$  К.
- На первом этапе в осесимметричной постановке проводится расчет стационарного основного течения вокруг затупленного конуса с гладкой поверхностью.

# Осесимметричное основное течение

$M = 5.95$ ,  $\alpha = 7^\circ$

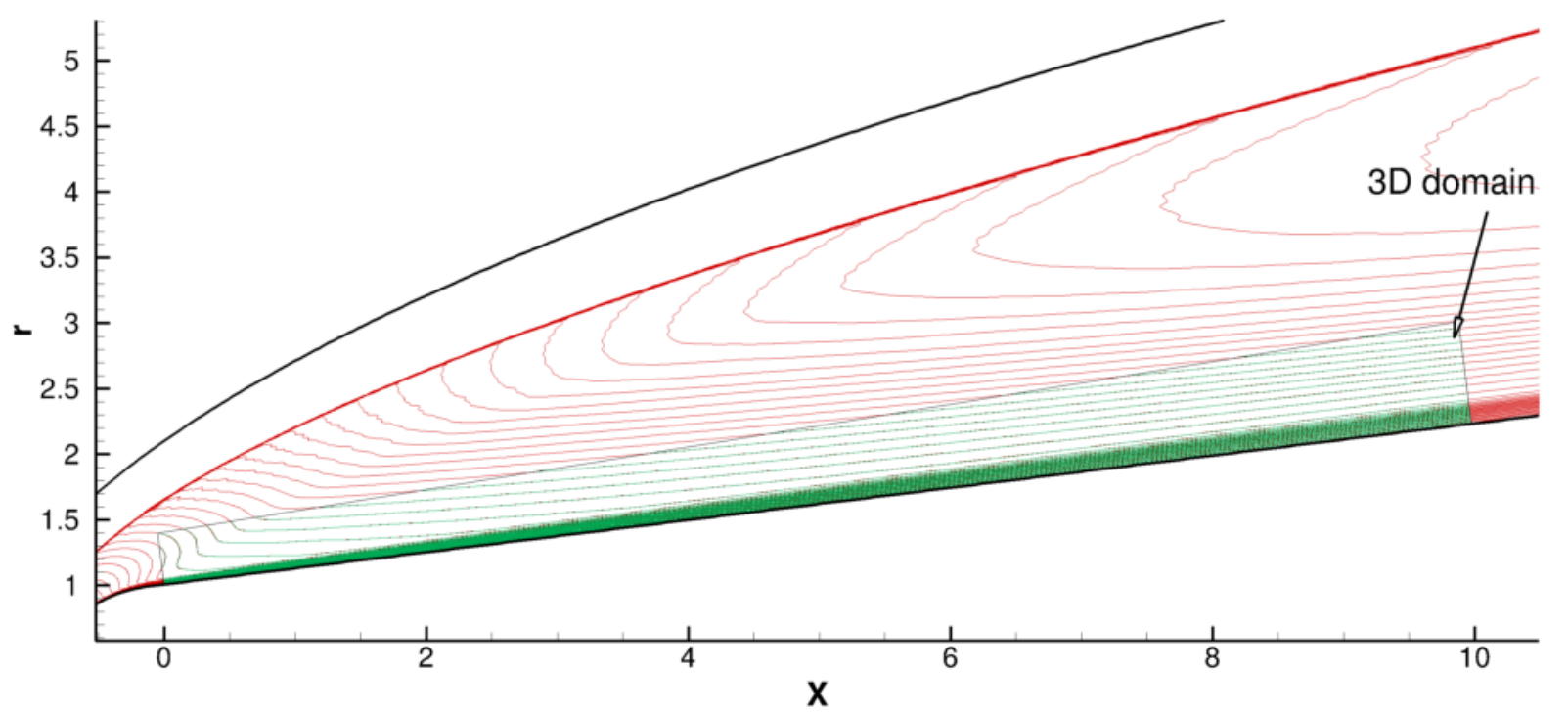


Поле числа Маха

## Постановка задачи

- Прямое численное моделирование выполняется в трехмерной расчетной области, получающейся поворотом вокруг оси конуса двумерного четырехугольника, чья нижняя граница совпадает с образующей конуса, а верхняя лежит в зоне градиентного течения за головной ударной волной, проходящей намного выше границы пограничного слоя.
- Раствор вычислительной области в азимутальном направлении составлял от  $15^\circ$  до  $30^\circ$ .
- На боковых границах накладывались периодические граничные условия.
- В трехмерных расчетах использовались сетки, насчитывающие до  $2304 \times 200 \times 160 \approx 73.7$  млн ячеек.
- В расчетах на центральных процессорах использовалось до 96 вычислительных ядер.

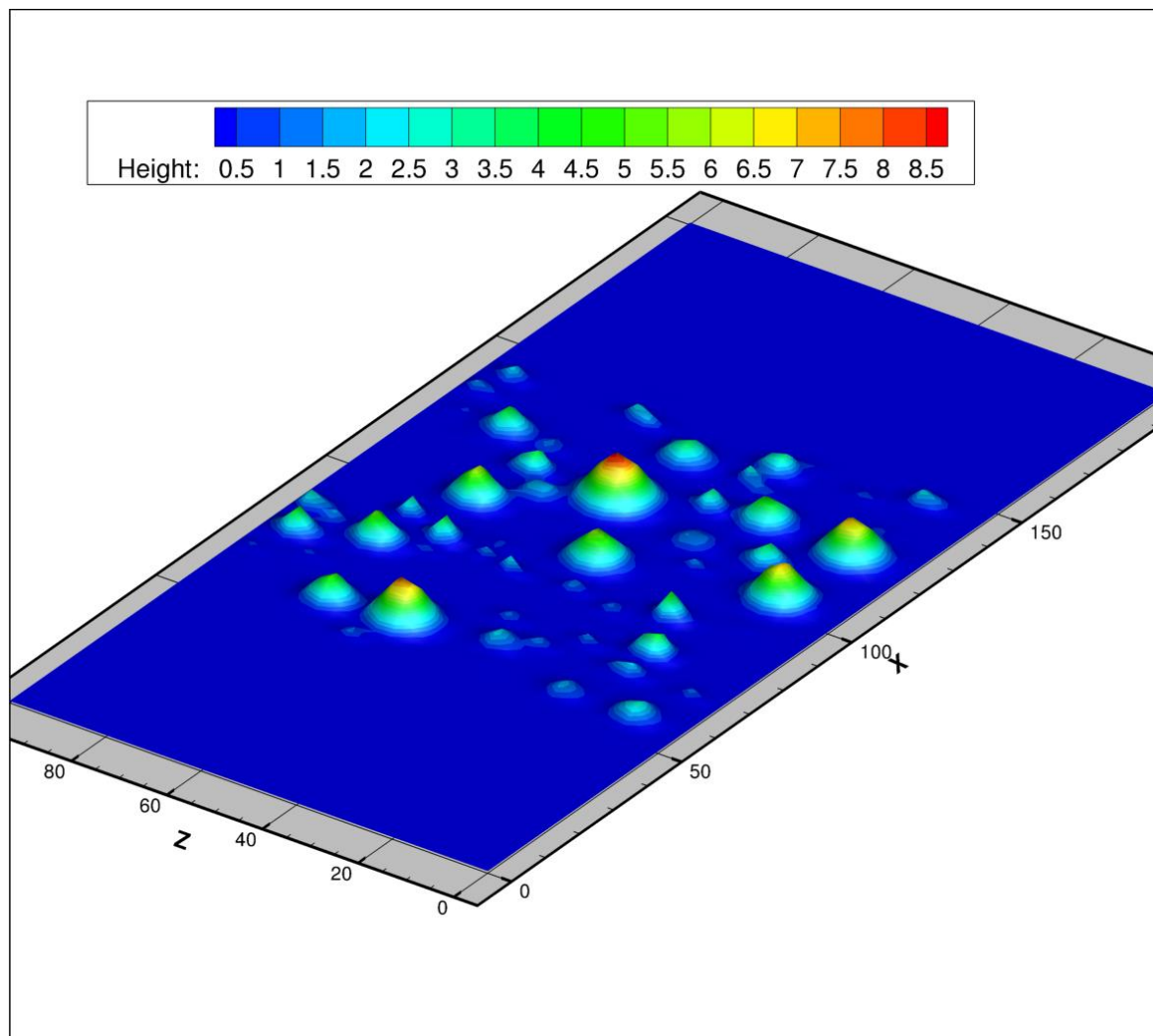
## Вычислительные области для осесимметричного и двумерного расчета



Изолинии числа Маха в осесимметричном и трехмерном расчетах



# Поверхностная шероховатость



$$h = H(\cos(0.5\pi r / R))^2$$

Случайное  
распределение

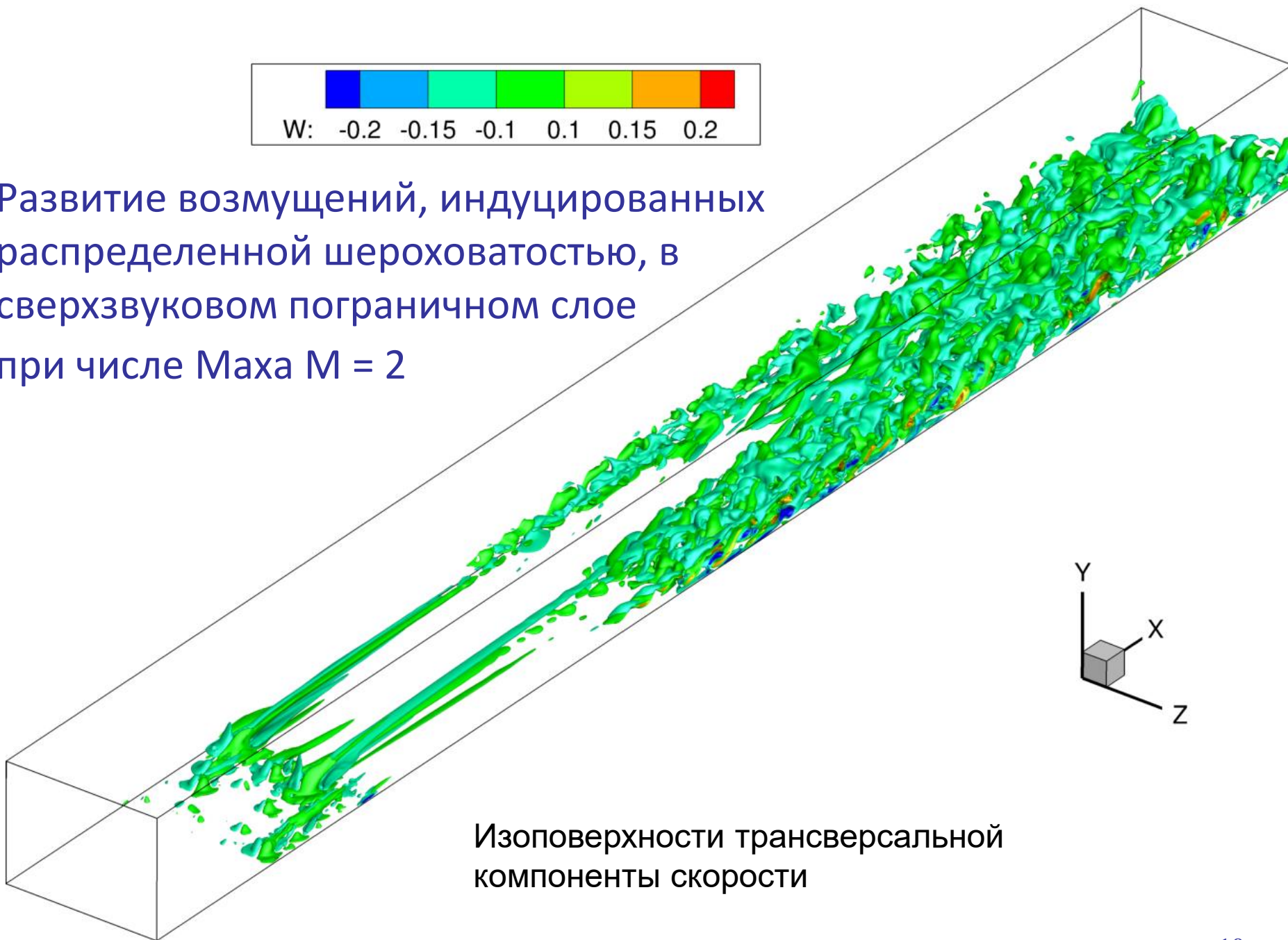
$$\delta < H < 10 \delta$$

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

$$\text{Re}_{kk} = U_h h / \nu_h = 40 \dots 500$$

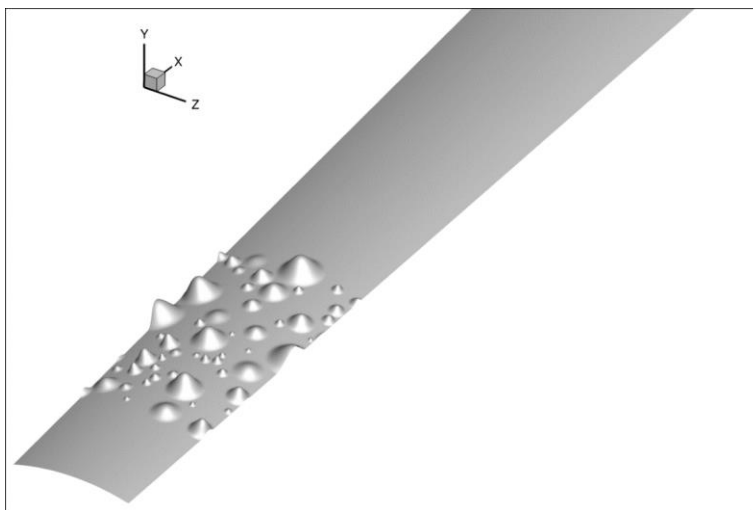


Развитие возмущений, индуцированных  
распределенной шероховатостью, в  
сверхзвуковом пограничном слое  
при числе Маха  $M = 2$



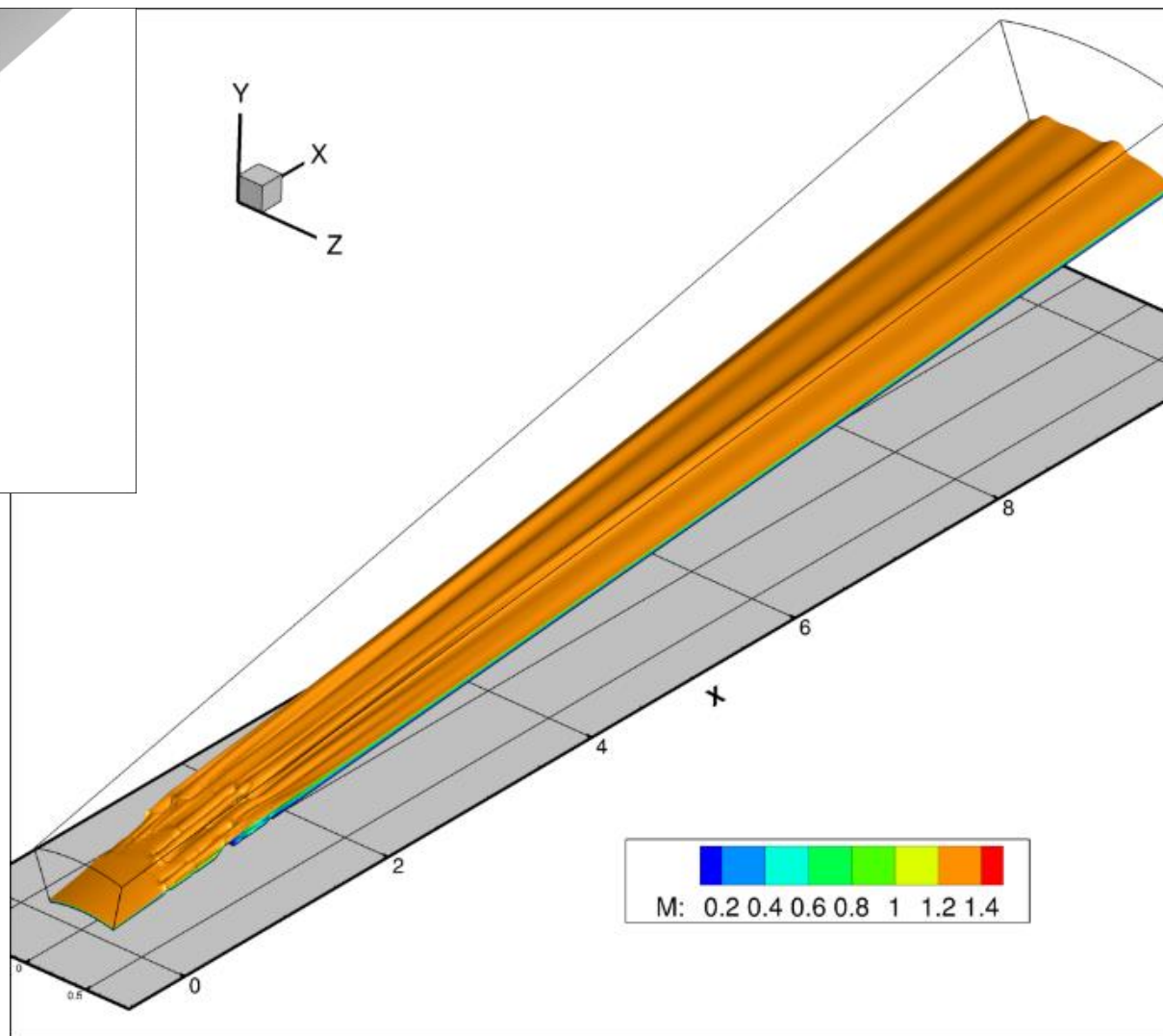
Изоповерхности трансверсальной  
компоненты скорости

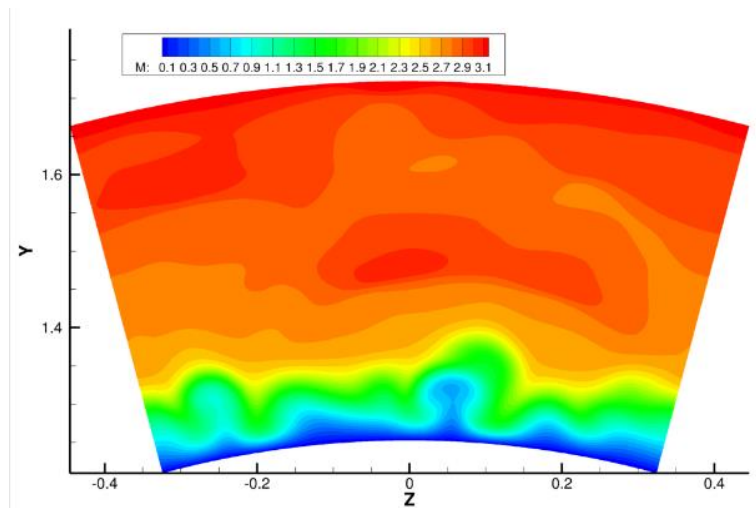
## Распределенная шероховатость вблизи затупленного носика



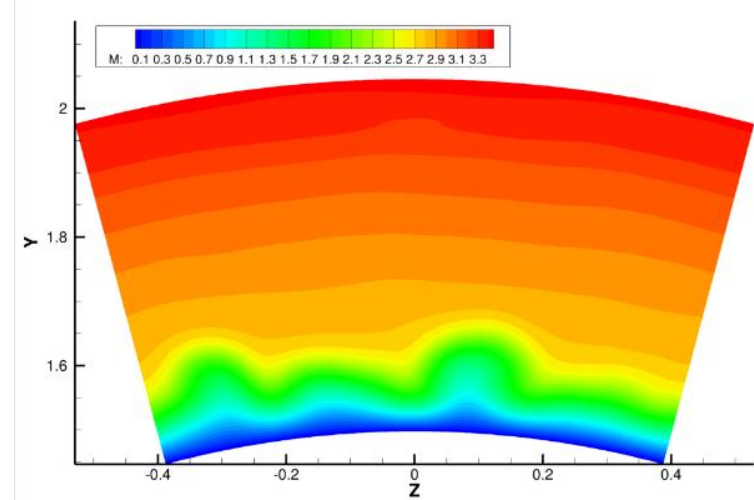
Поверхность конуса  
с распределенной  
шероховатостью

Изоповерхности  
числа Маха

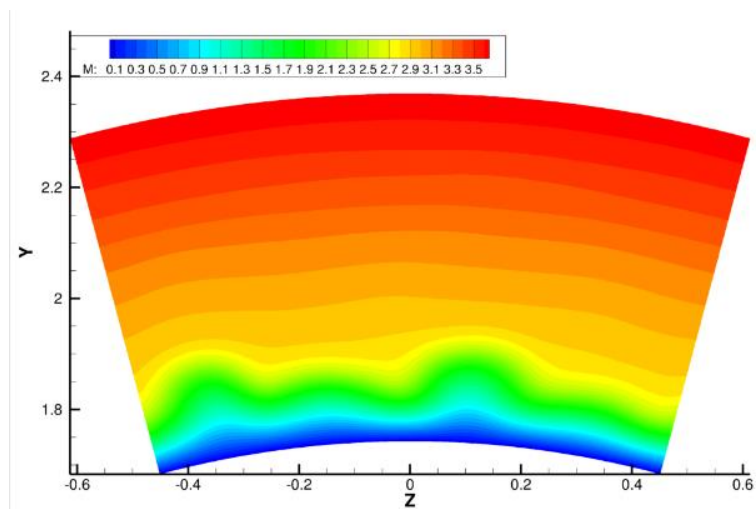




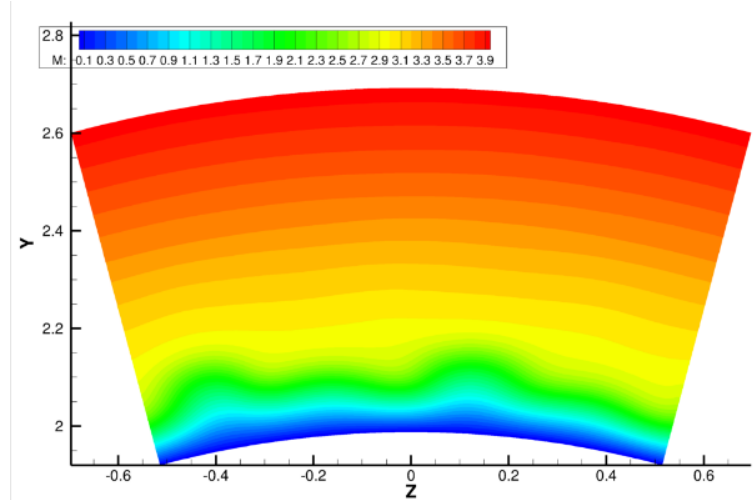
$x = 2R$



$x = 4R$



$x = 6R$

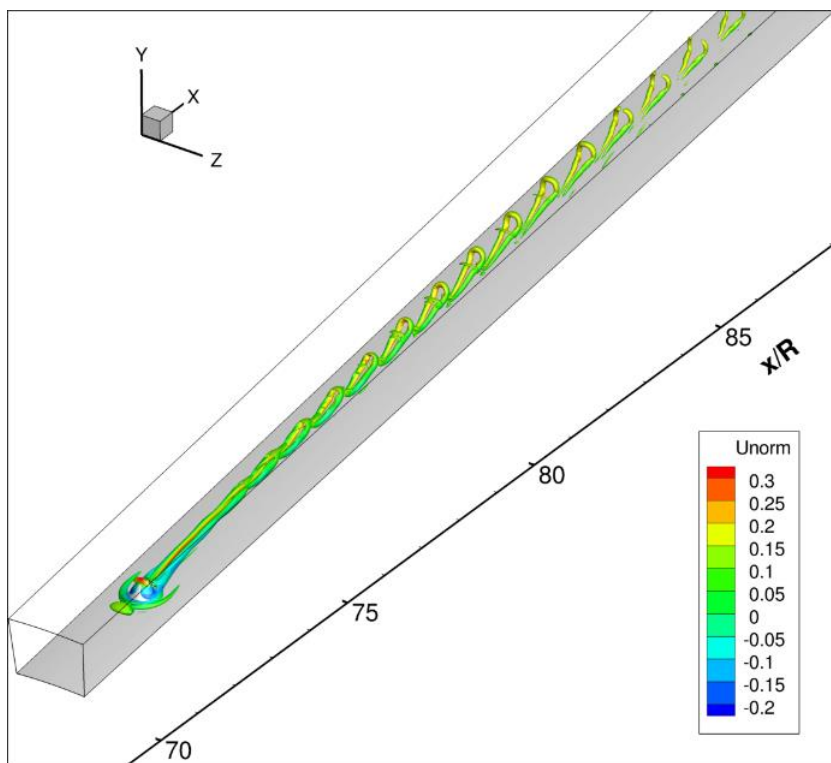


$x = 8R$

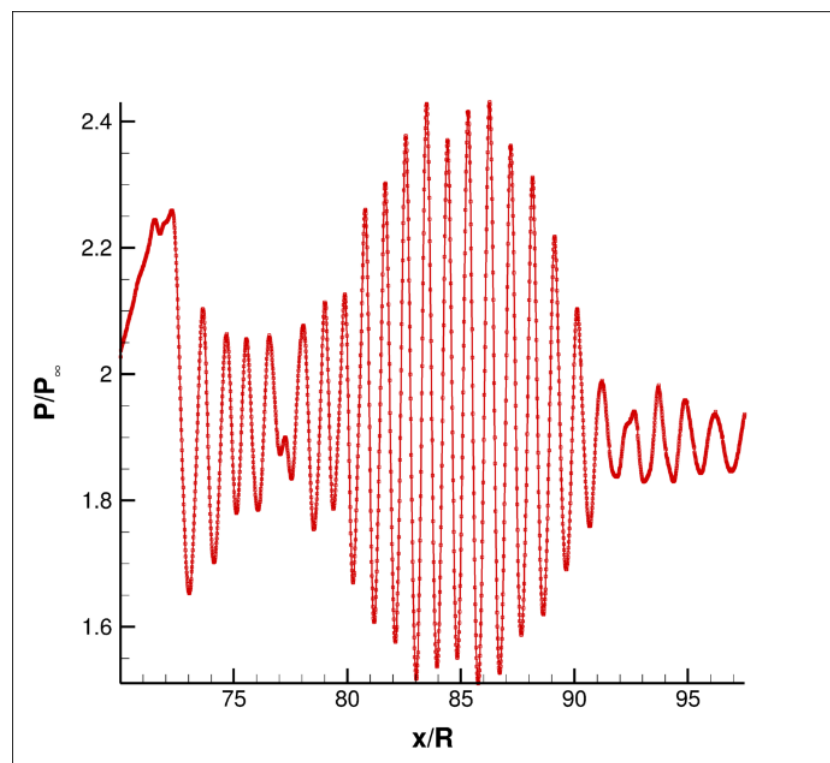
Поля числа Маха в поперечных сечениях

## Одиночный элемент шероховатости на большом расстоянии от носика вместе с вдувом/отсосом вверх по потоку

Частота периодического вдува/отсоса  $\nu^* = 400$  кГц, что в соответствии с данными предварительного выполненного линейного анализа устойчивости близко к основной частоте возмущений второй моды при данном значении продольной координаты.



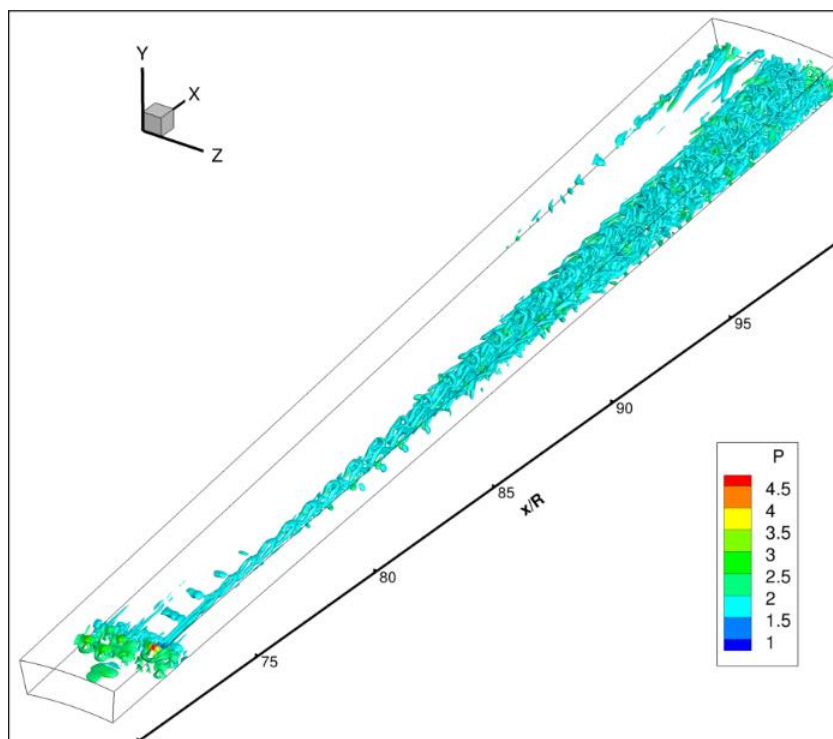
Изоповерхность Q-критерия



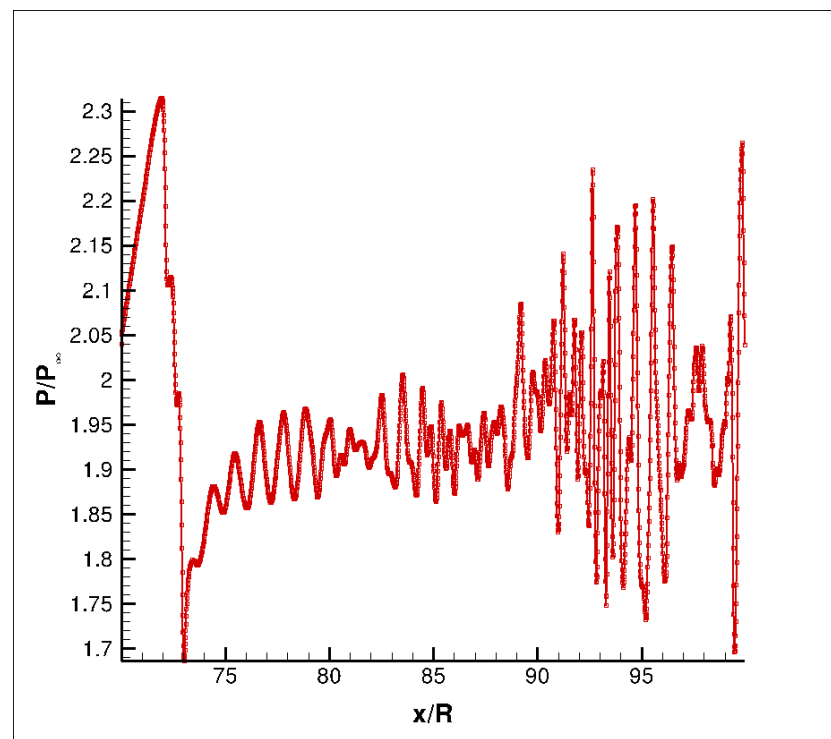
Пульсации давления на поверхности



## Распределенная шероховатость на большом расстоянии от носика вместе с вдувом/отсосом вверх по потоку

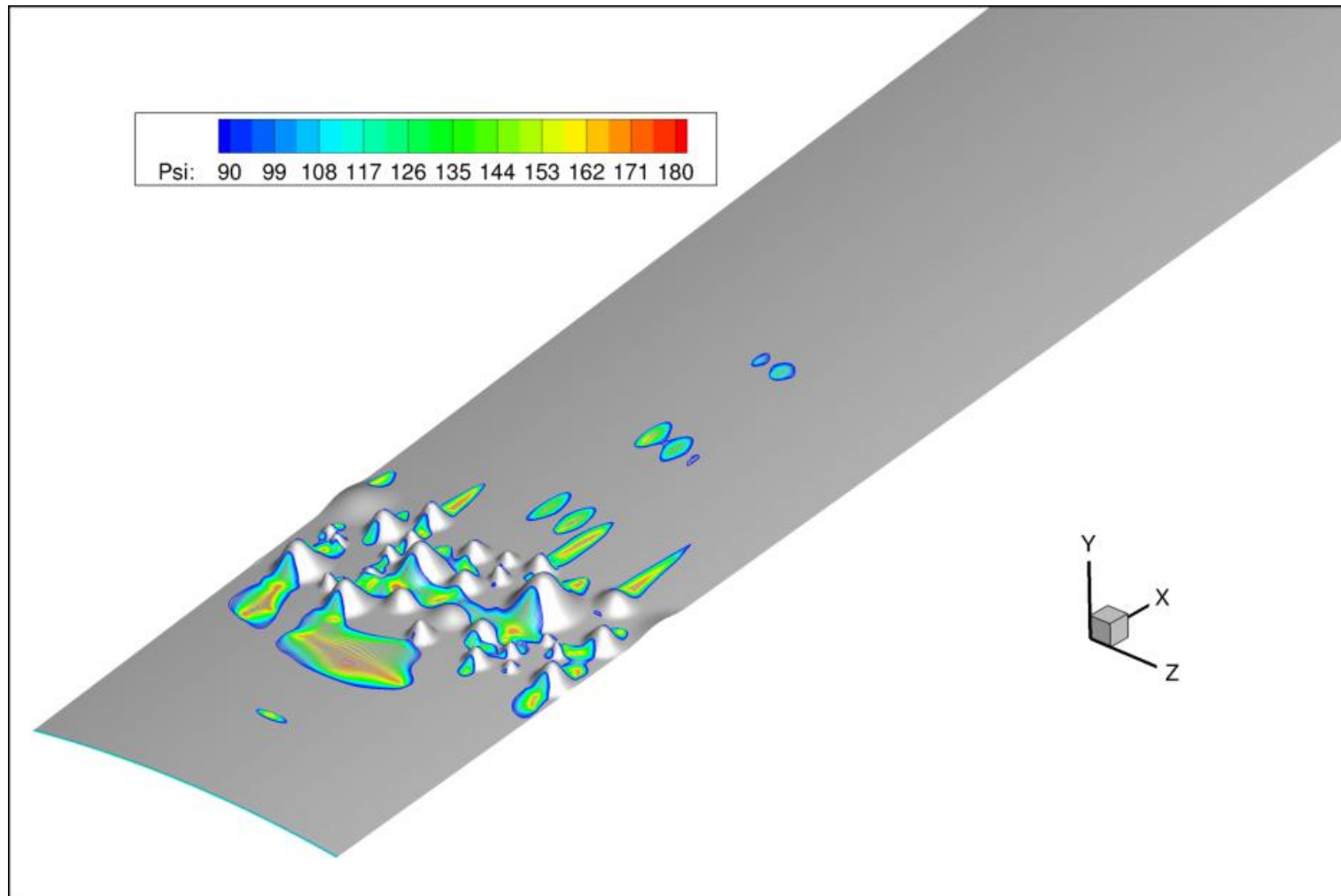


Изоповерхность Q-критерия



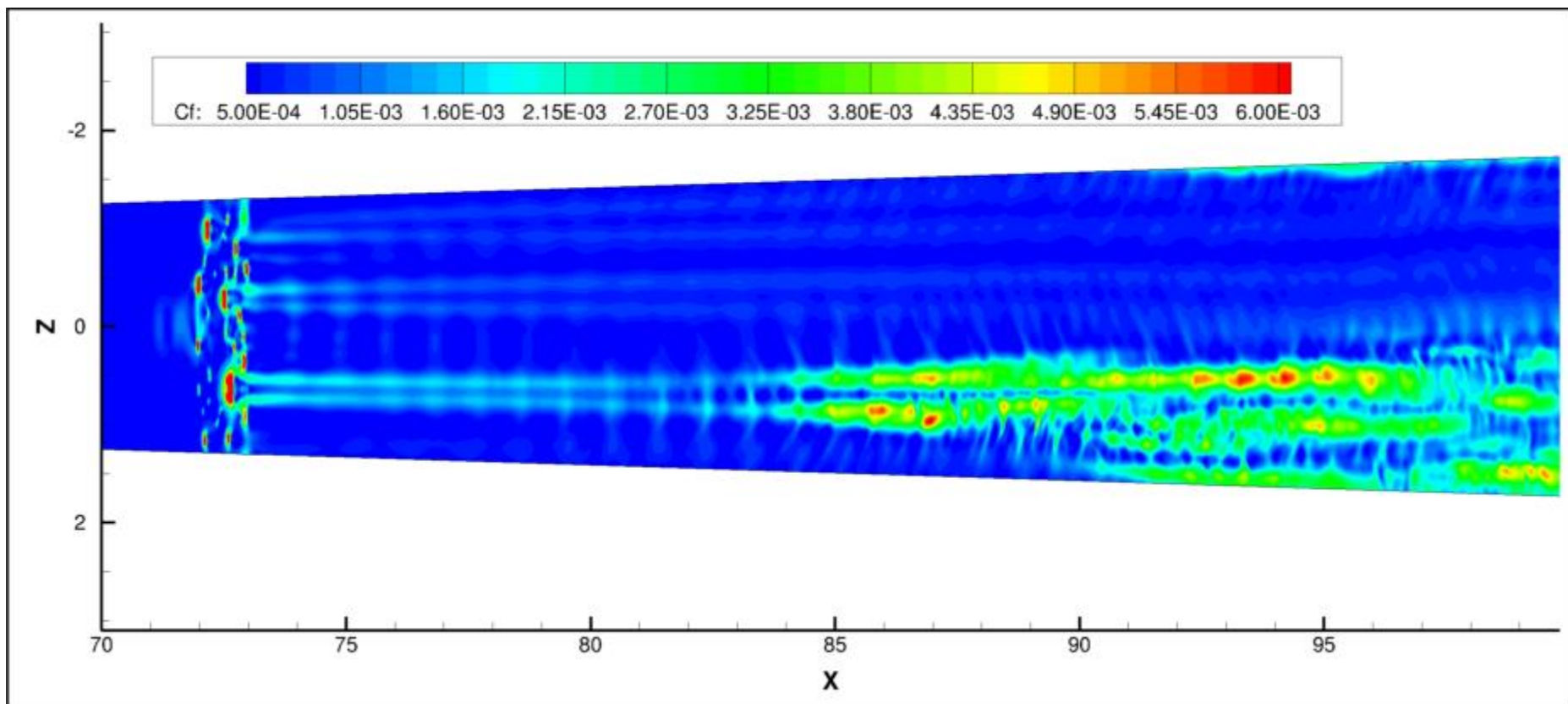
Пульсации давления на поверхности

## Распределенная шероховатость на большом расстоянии от носика вместе с вдувом/отсосом вверх по потоку



Направление течения у поверхности конуса

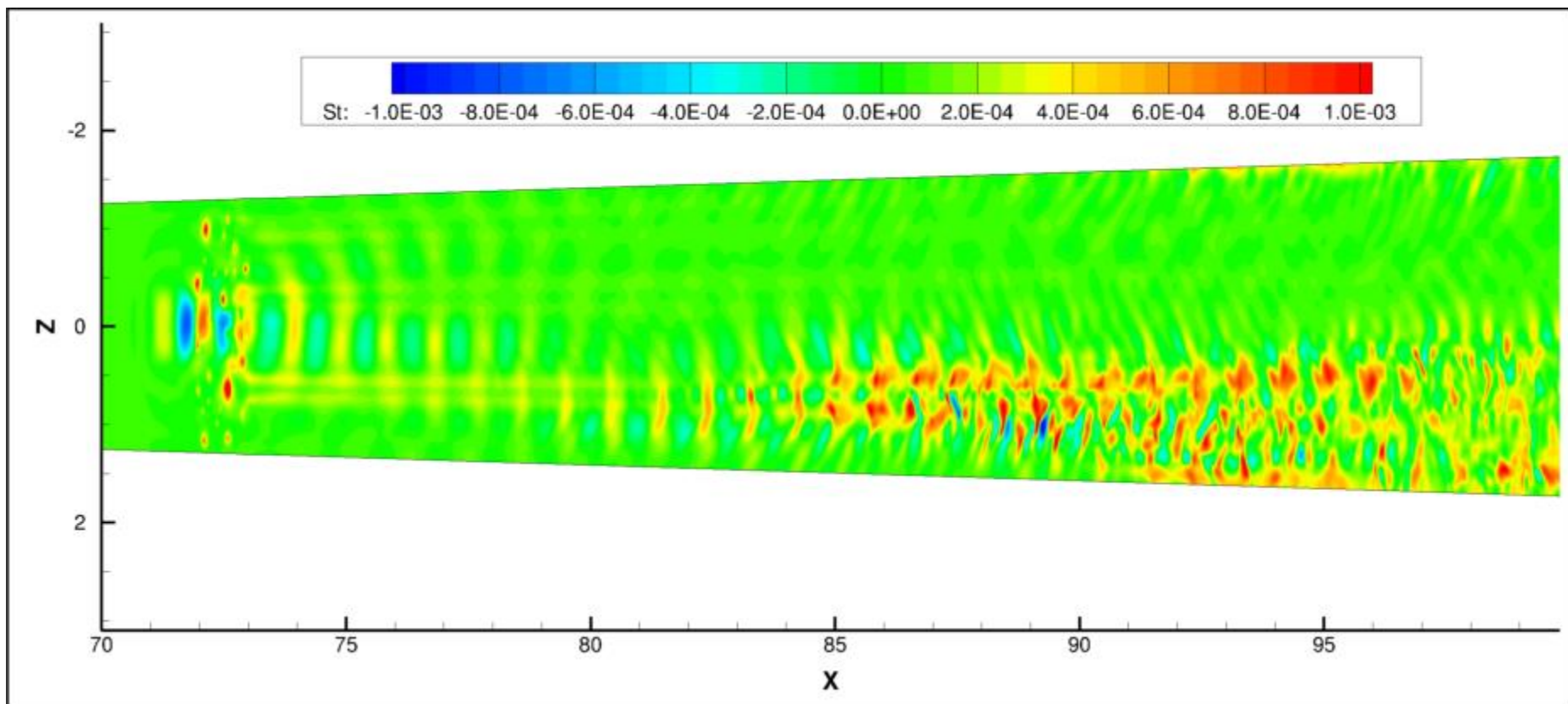
## Распределенная шероховатость на большом расстоянии от носика вместе с вдувом/отсосом вверх по потоку



Распределение коэффициента трения на поверхности конуса

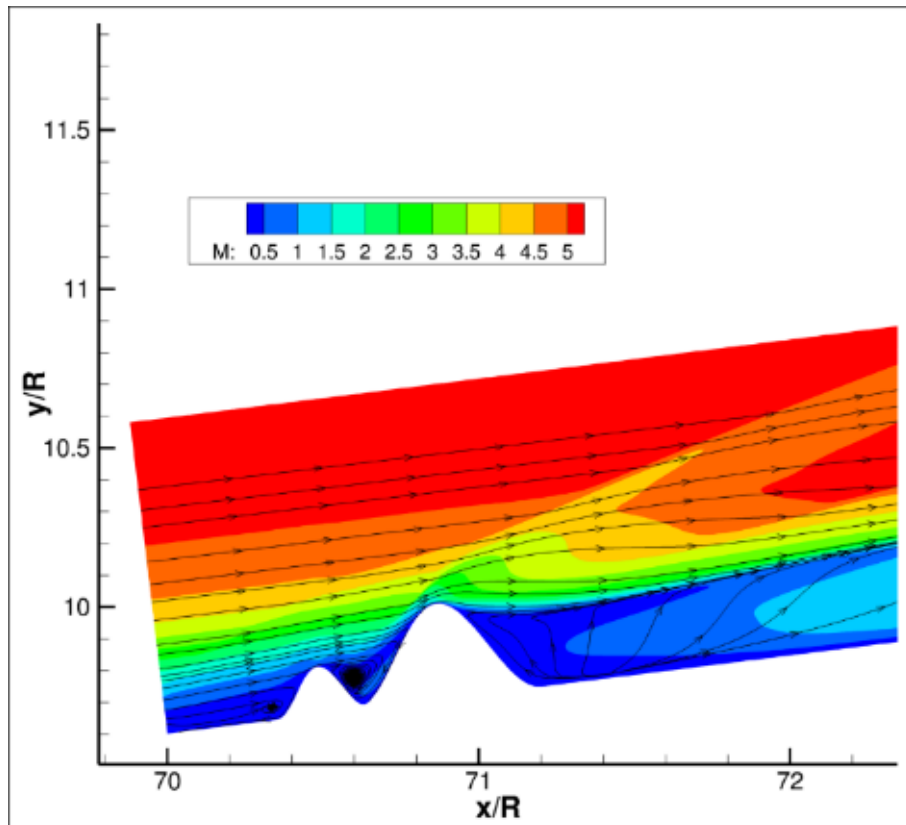


## Распределенная шероховатость на большом расстоянии от носика вместе с вдувом/отсосом вверх по потоку

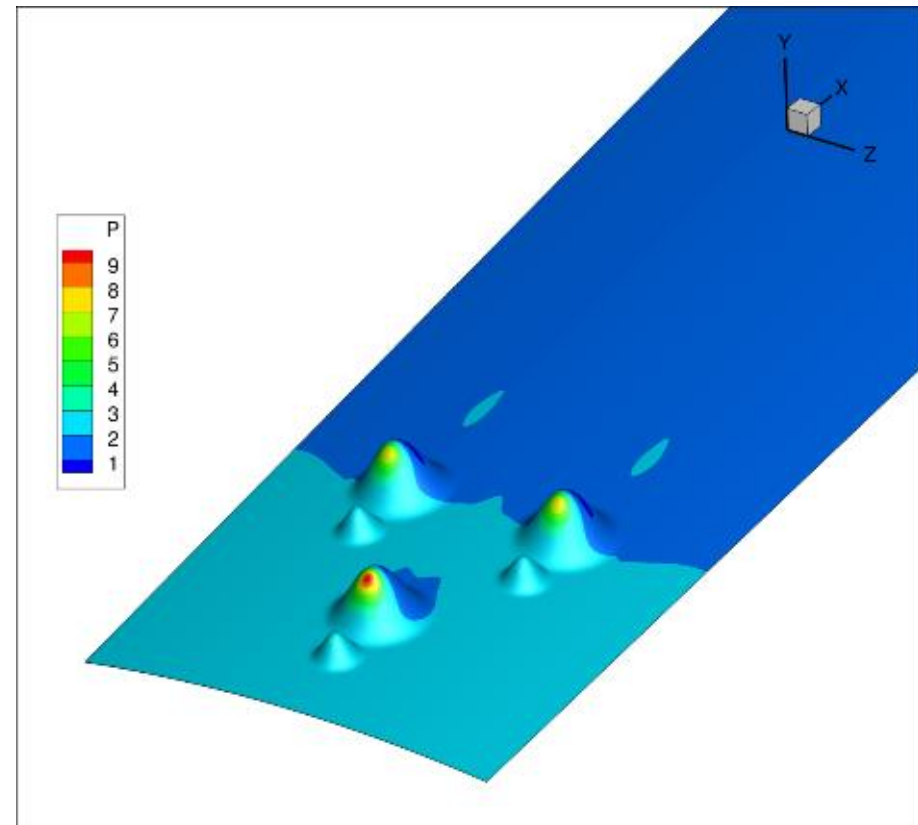


Распределение числа Стантона на поверхности конуса

## Группа взаимодействующих элементов шероховатости

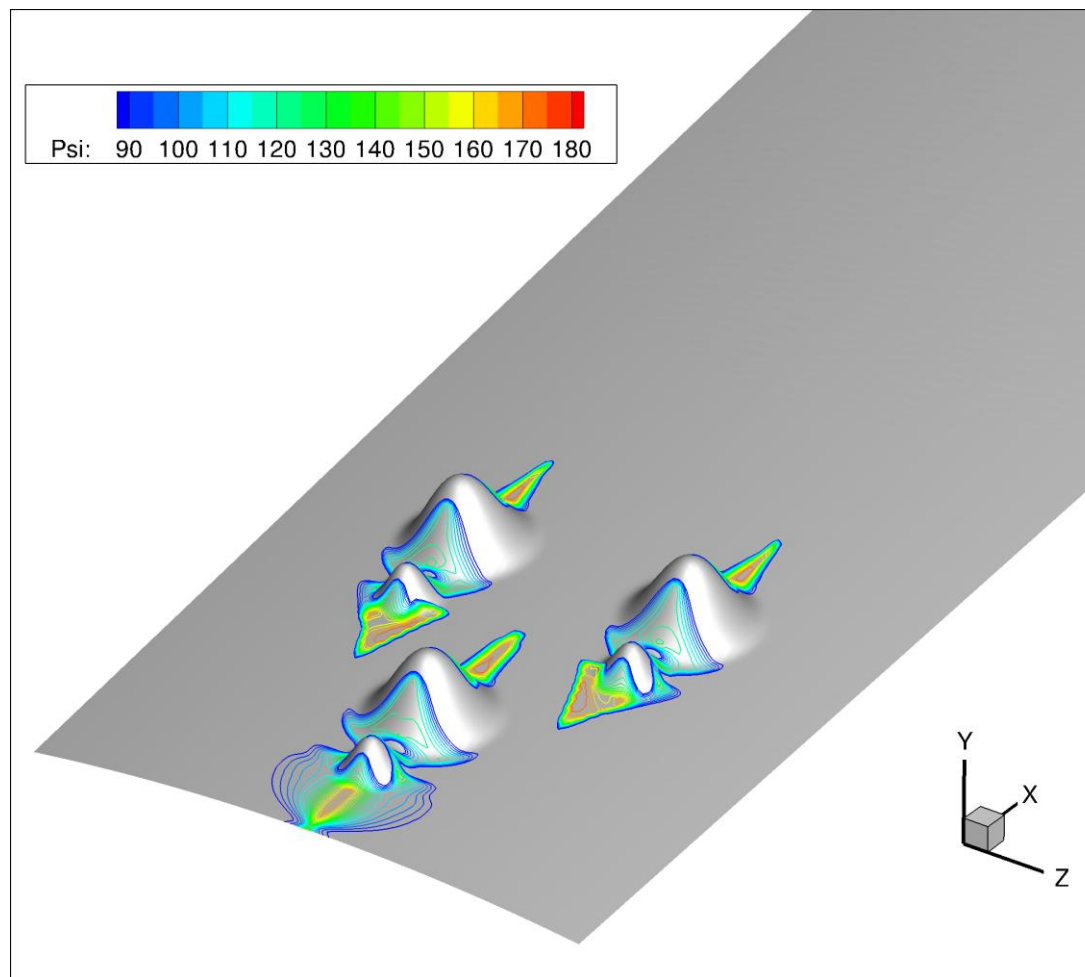


Поле числа Маха и линии тока в сечении  $\varphi = 0$

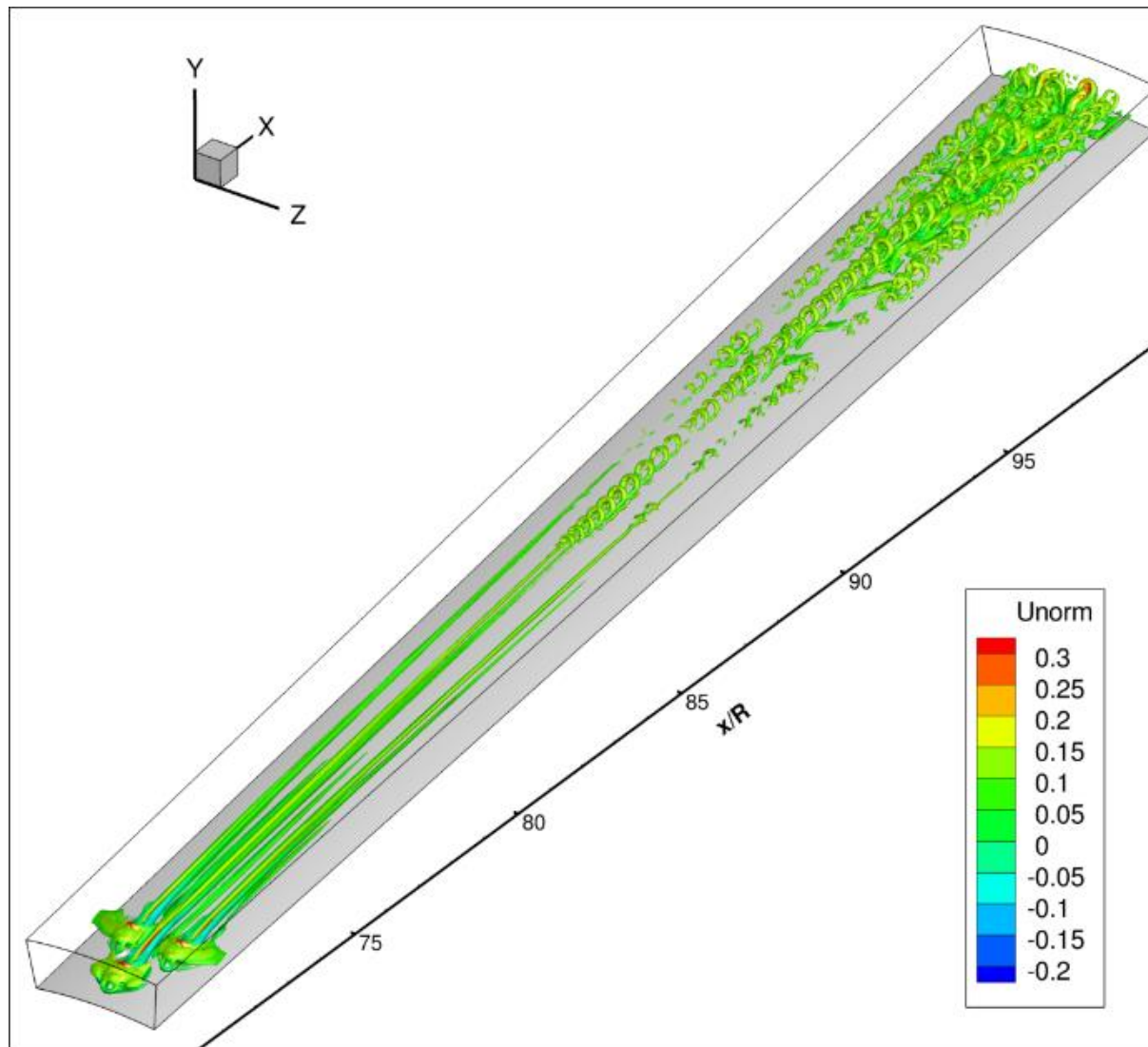


Давление на поверхности конуса

## Группа взаимодействующих элементов шероховатости

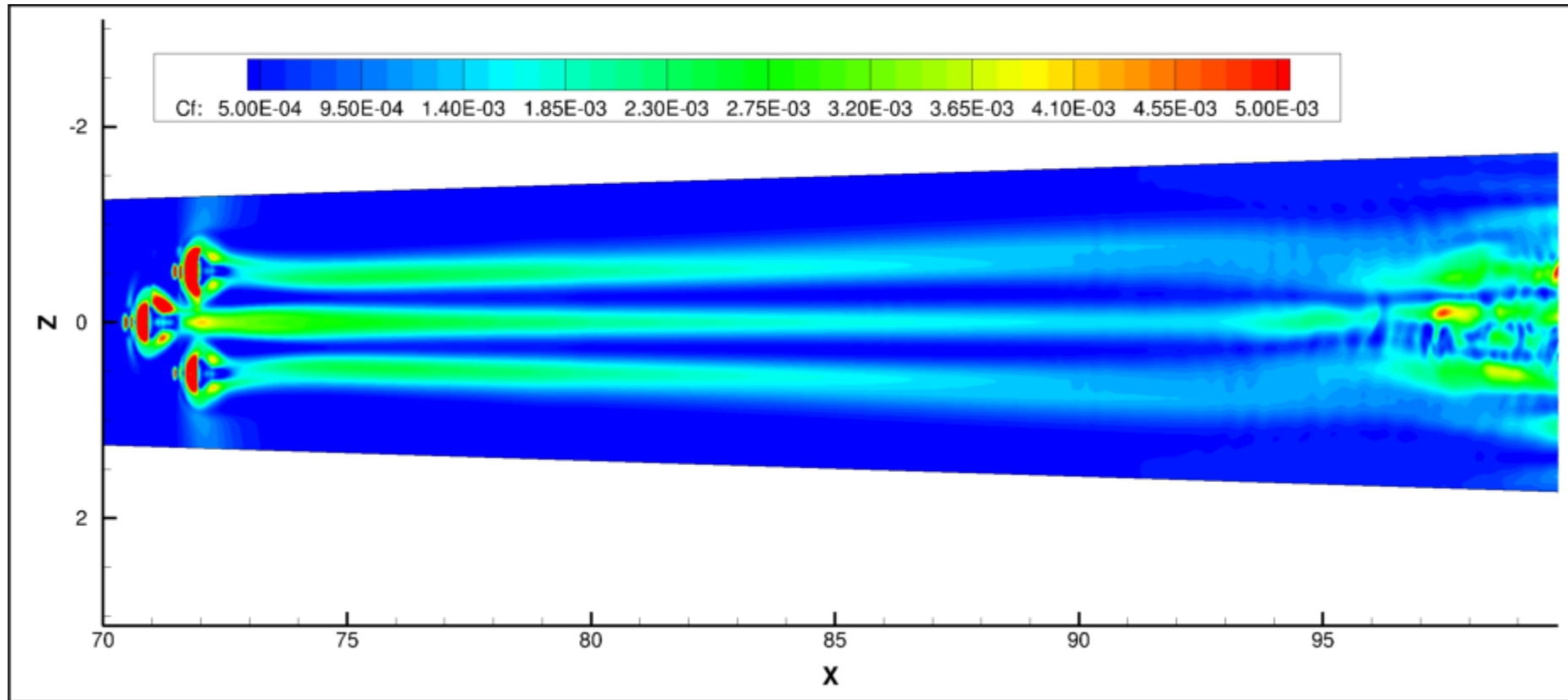


Направление течения у поверхности конуса



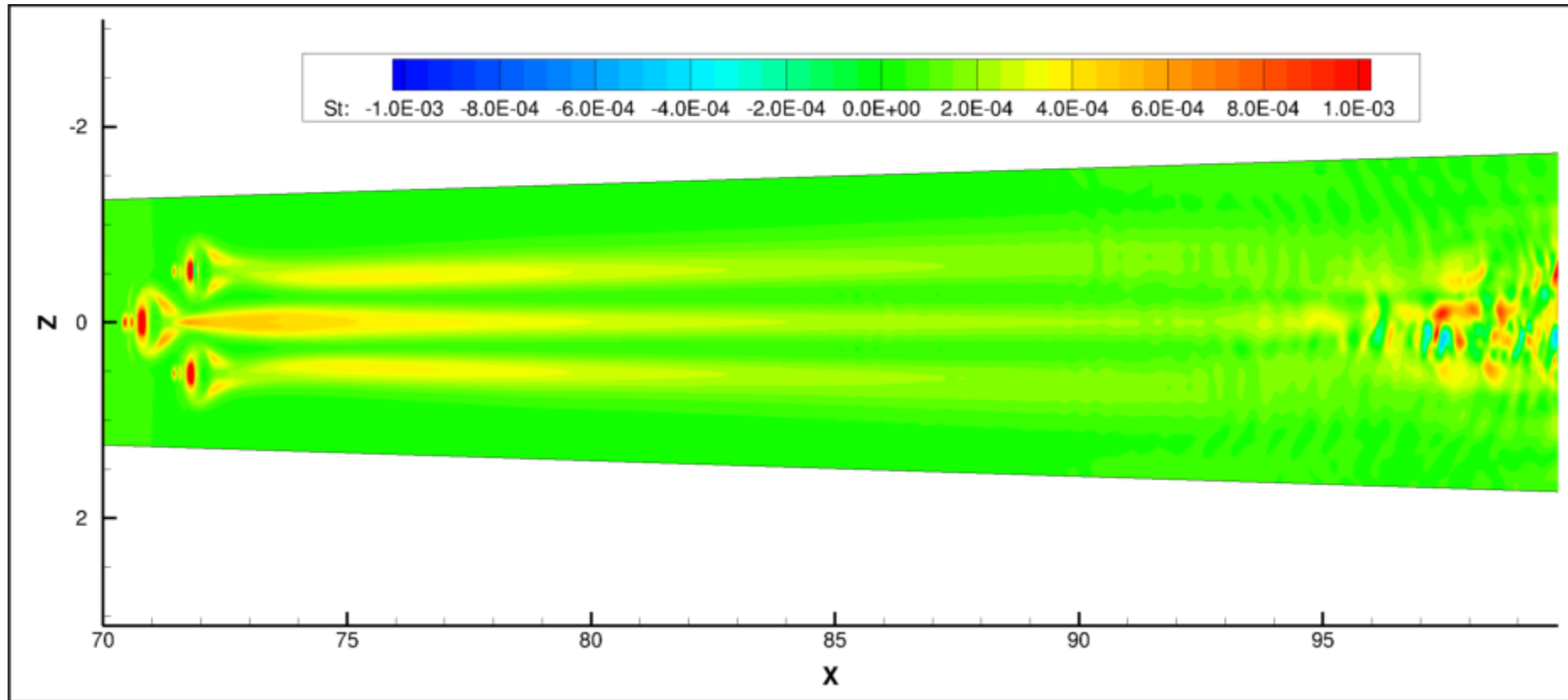
Группа взаимодействующих элементов шероховатости. Q-критерий

## Группа взаимодействующих элементов шероховатости



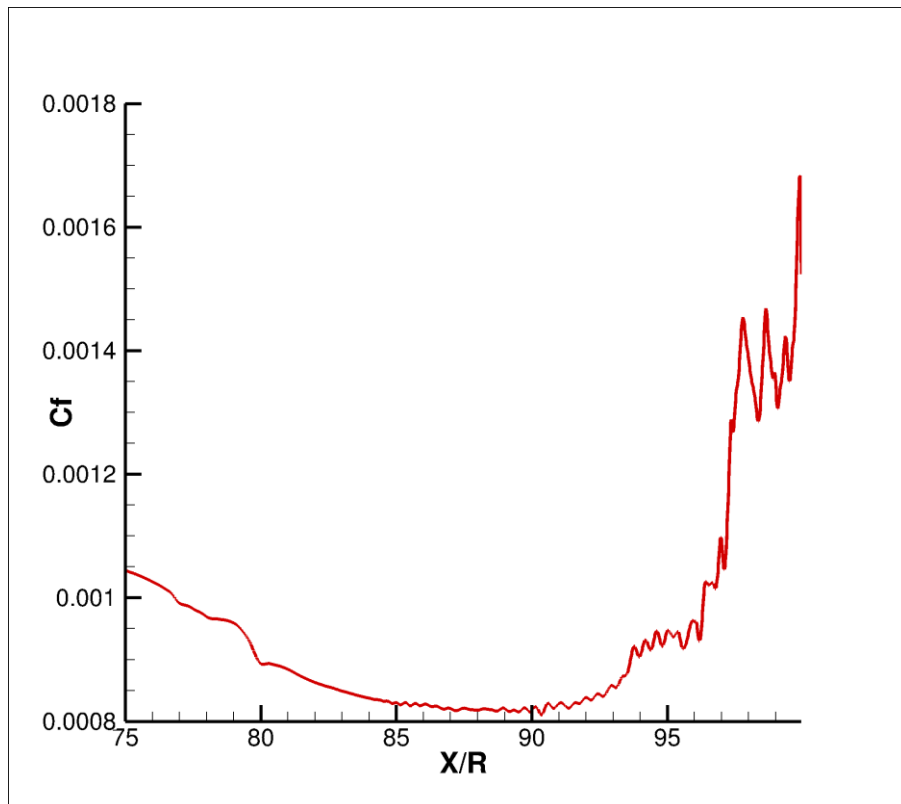
Распределение коэффициента трения на поверхности конуса

## Группа взаимодействующих элементов шероховатости

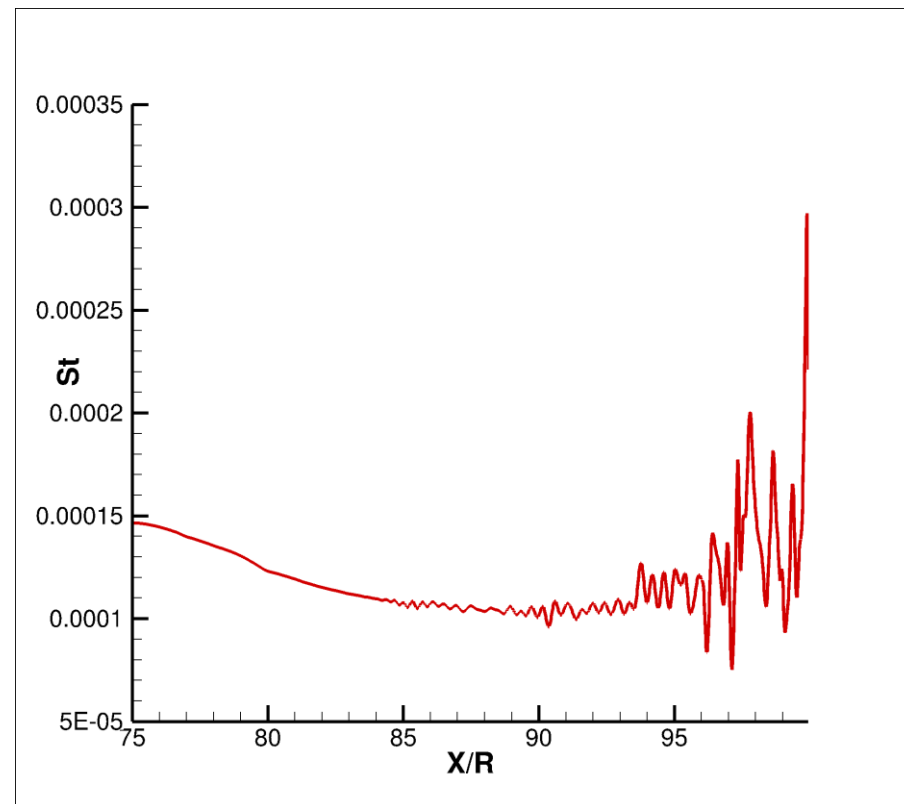


Распределение числа Стантона на поверхности конуса

## Группа взаимодействующих элементов шероховатости



Осредненный коэффициент трения



Осредненное число Стантона

## Выводы и заключения

- Влияние поверхностной шероховатости на среднее течение и генерацию неустойчивых возмущений в сверхзвуковом пограничном слое на затупленном конусе при числе Маха 5.95 было изучено с помощью прямого численного моделирования.
- Рассмотренные случаи включали
  - случайно распределенную шероховатость,
  - одиночный элемент шероховатости,
  - поверхностную шероховатость + периодический вдув/отсос,
  - взаимодействие группы элементов шероховатости.
- Наблюдавшийся ламинарно-турбулентный переход был связан с образованием интенсивных продольных вихрей вниз по потоку от элементов шероховатости, росту пульсаций течения в областях, занятых этими вихрями и взаимодействию вихрей, порожденных различными элементами шероховатости.