VIII Российская конференция
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
В АЭРОАКУСТИКЕ И АЭРОДИНАМИКЕ
20—25 сентября 2021 г., ГЕЛЕНДЖИК

Численное исследование взаимодействия скачка уплотнения с неустойчивым сверхзвуковым пограничным слоем

Д.В. Хотяновский, А.Н. Кудрявцев, А.А. Шершнев
Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН

Содержание

- Введение и мотивация.
- Постановка задачи.
- Численные методики.
- Результаты:
  - линейная теория устойчивости;
  - прямое численное моделирование переходного пограничного слоя на плоской пластине, влияние начальной амплитуды возмущений;
  - моделирование взаимодействие косого падающего скачка с переходным пограничным слоем при возбуждении во входном сечении волн линейной теории;
  - моделирование взаимодействие косого падающего скачка с переходным пограничным слоем при наличии на пластине одиночной шероховатости.
  - моделирование отрывного пограничного слоя на рампе сжатия с различными возмущениями.

Введение и мотивация

- Взаимодействие ударной волны с пограничным слоем (SWBLI) – сложное явление, происходящее в течениях около различных частей трансзвуковых и сверхзвуковых летательных аппаратов, лопаток компрессоров и элементов воздухозаборников ВРД.

- Большой интерес вызывают нестационарные явления, сопровождающие SWBLI и приводящие к значительным низкочастотным пульсациям отрывной зоны

Постановка задачи

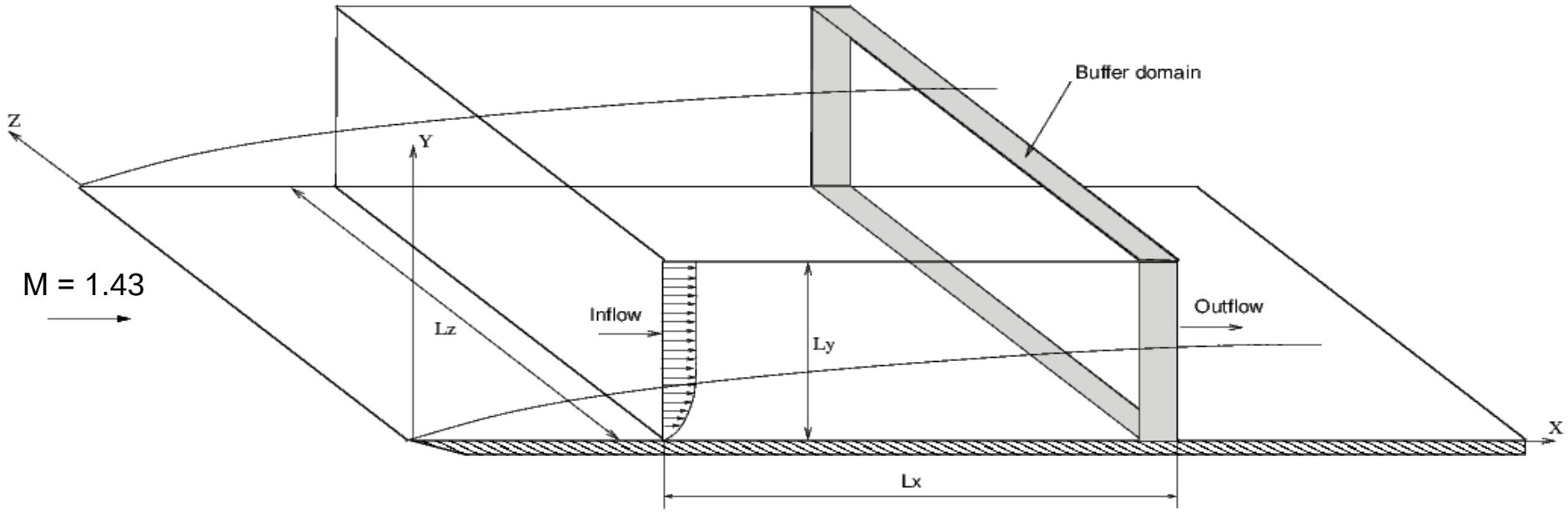


Схема вычислительной области при моделировании пограничного слоя на пластине

Численные методики

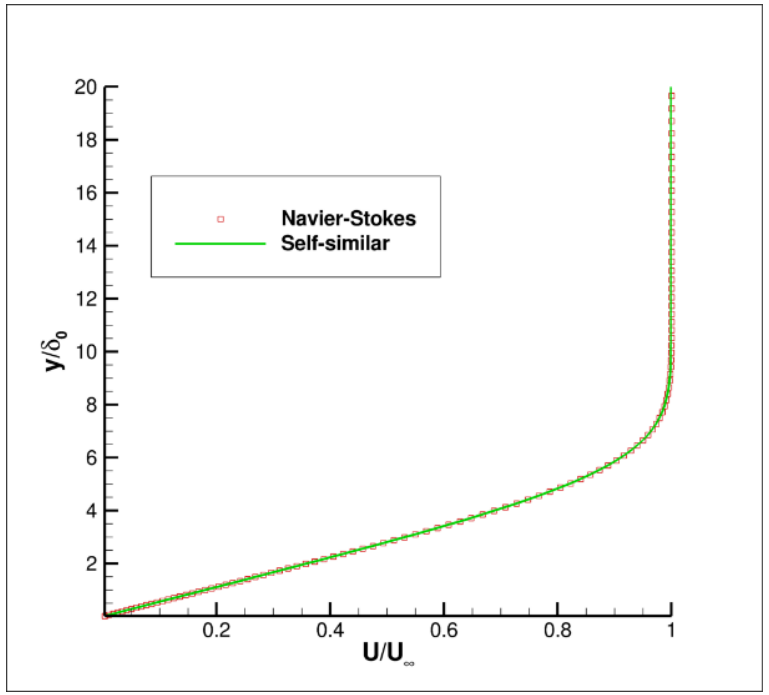
- Код CFS3D для решения сжимаемых нестационарных уравнений Навье–Стокса:
  - конечно-разностная WENO-5 схема для вычисления конвективных потоков или MUSCL TVD схема 4-го порядка;
  - центральная дискретизация диффузионных членов;
  - явная схема Рунге–Кутты 2-го и 4-го порядков для интегрирования по времени;
  - распараллеливание MPI через декомпозицию расчетной области.
- Код HyCFS — новый код для гибридных суперкомпьютеров:
  - распараллеливание Nvidia CUDA для использования GPU;
  - ниточная параллелизация OpenMP в пределах общей памяти узла;
  - сообщения MPI между узлами.

Вычислительная область и граничные условия

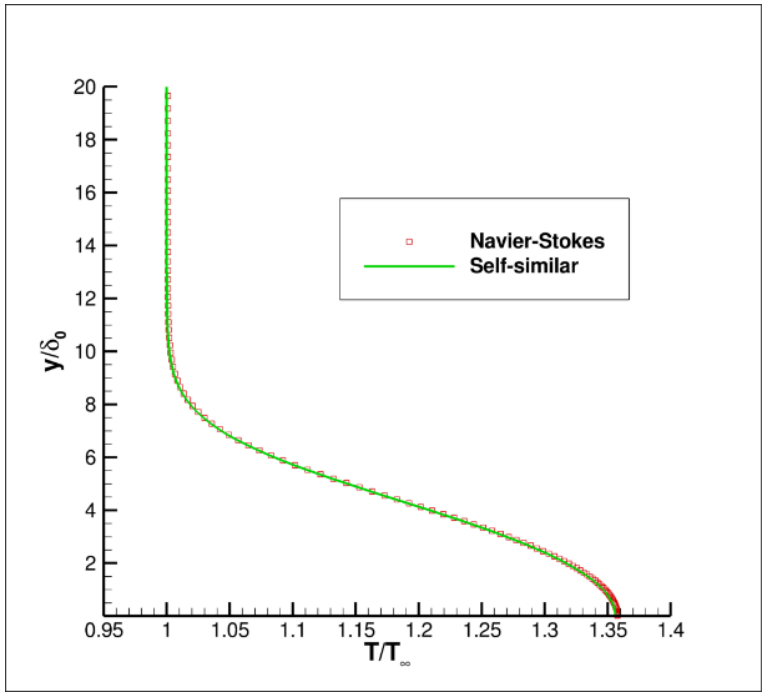
- Граничные условия:
  - автомодельные профили пограничного слоя на входной границе;
  - для возбуждения неустойчивости на автомодельный профиль накладываются возмущения заданной амплитуды в виде собственных функций линейной теории;
  - мягкие неотражающие условия на выходной и верхней границе;
  - периодические условия по размаху;
  - поверхность пластины: условия прилипания, нулевой градиент давления, заданная температура стенки T_w ;
  - на части верхней границы задаются условия за косым скачком с заданным углом;
  - одиночная шероховатость на поверхности пластины.
- Вычислительная область: $L_x = 4000\,\delta$, $L_y = 82\,\delta$, $L_z = 120\,\delta$.
- Структурированная сетка $N_x = 2304$, $N_y = 300$, $N_z = 96$, (75 млн.).
- Вычисления проводятся на 64 ядрах ЦПУ кодом CFS3D или 8 видеокартах Nvidia кодом HyCFS.

Ламинарный пограничный слой. Профили во входном сечении

$M = 1{,}45$, $Re_{\delta 0} = 700$, $Re_{x0} = 0{,}49 \cdot 10^6$, $T_w / T_\infty = 1{,}356$. ($\delta_{99} = 5{,}7$).



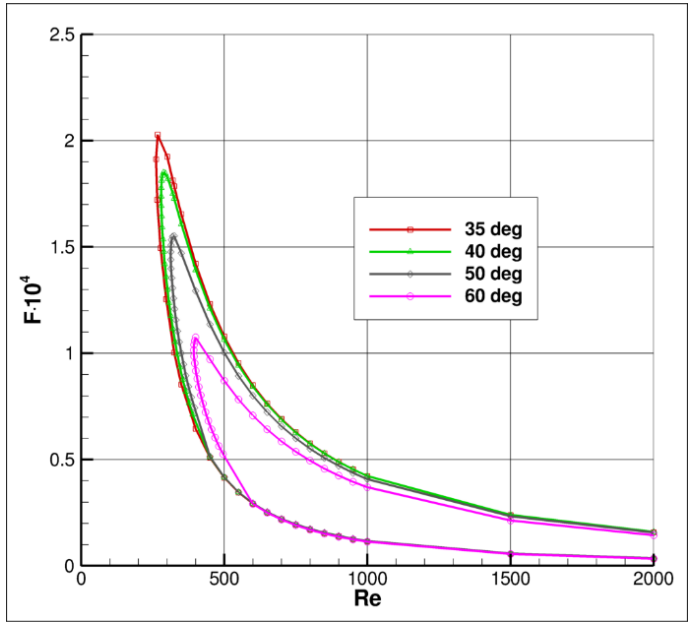
Продольная компонента скорости



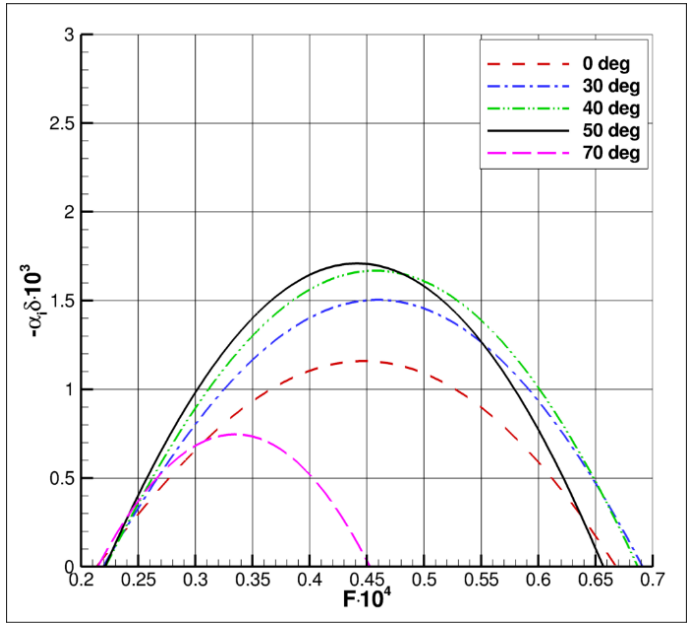
Температура

Сплошные кривые соответствуют автомодельному решению

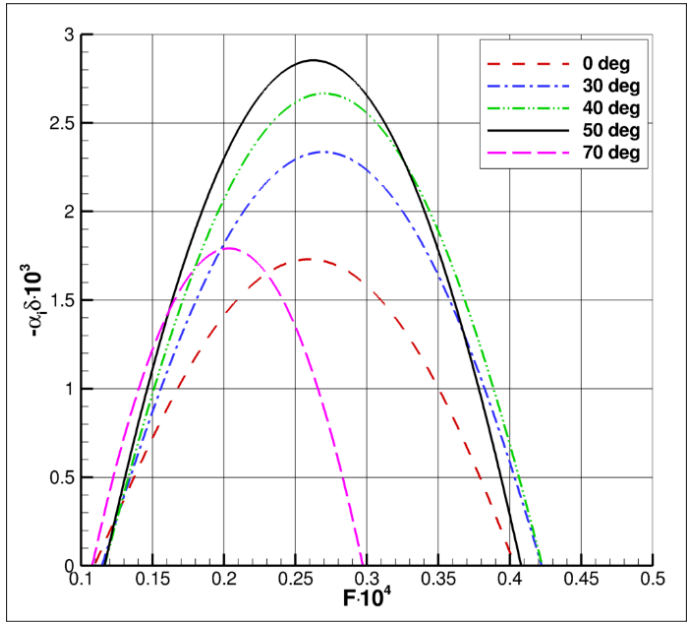
Линейная теория устойчивости для трехмерных возмущений. $M = 1{,}45$, $T_w / T_e = 1{,}356$



Кривые нейтральной устойчивости для различных углов волнового вектора χ

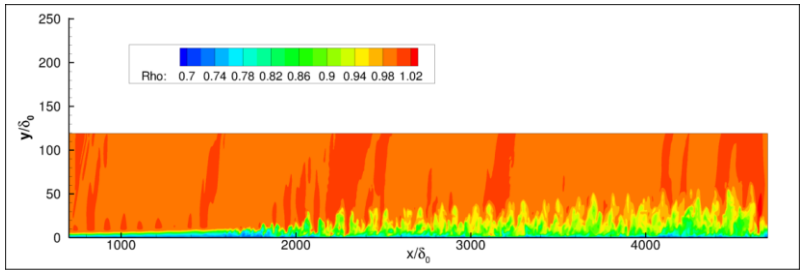


Инкременты нарастания для различных углов χ при Re = 700

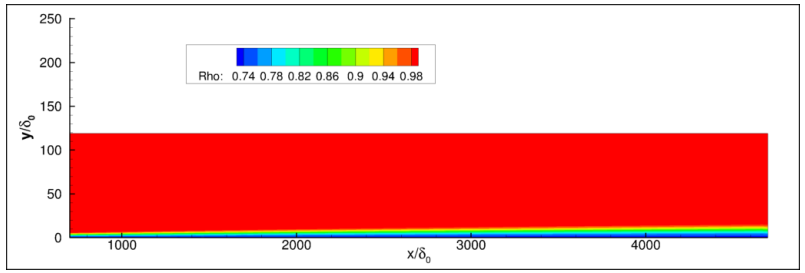


Инкременты нарастания для различных углов χ при Re = 1000

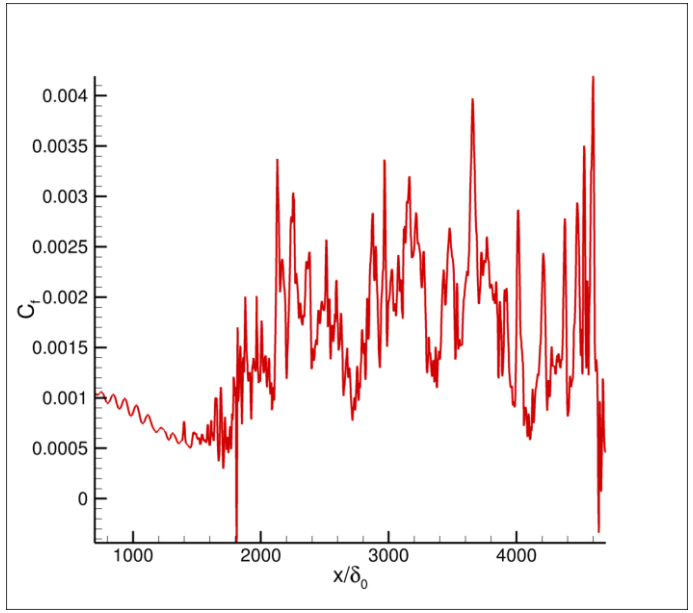
Влияние начальной амплитуды возмущений. Пограничный слой на пластине без скачка.



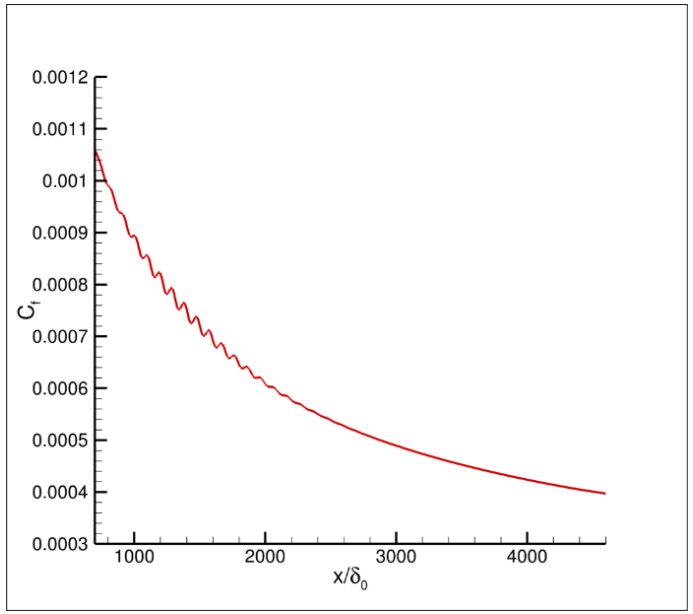
Мгновенное поле плотности. A_0 = 0,01



Мгновенное поле плотности. A_0 = 0,001

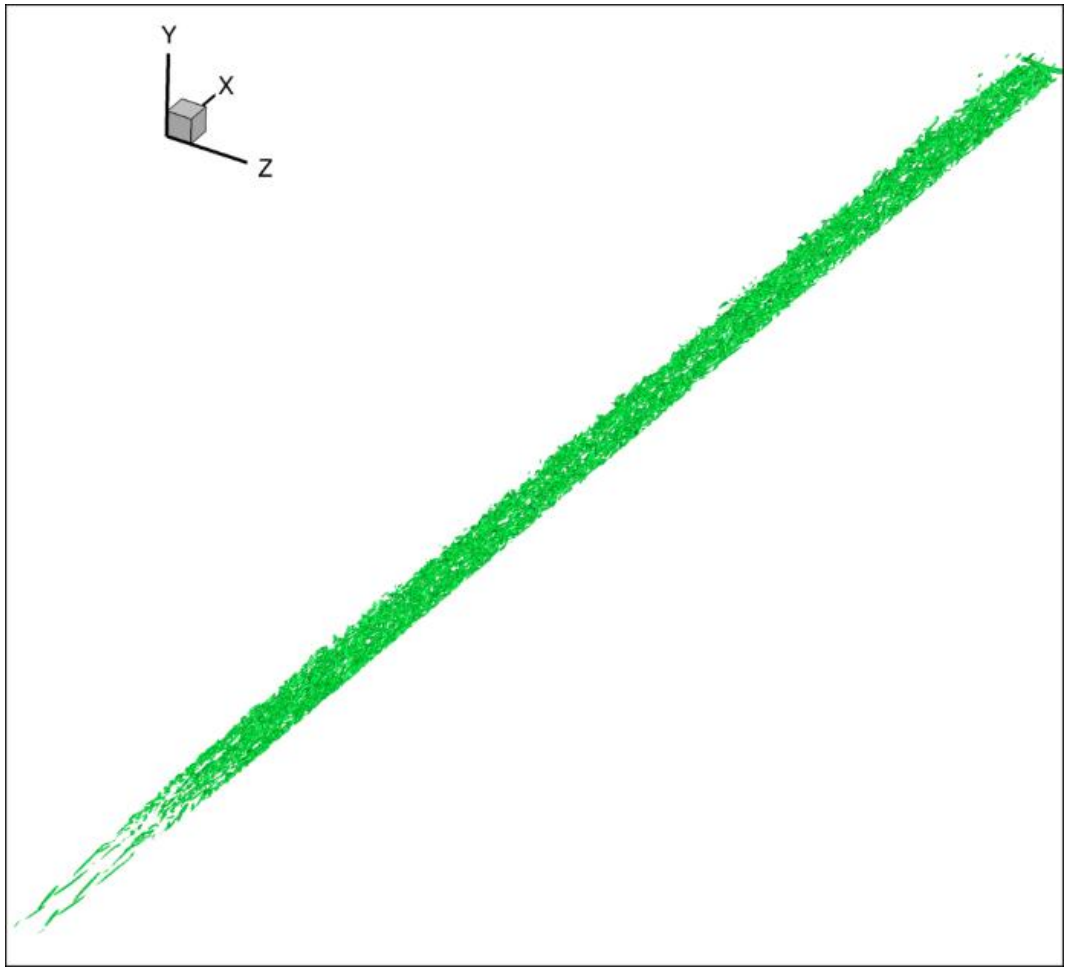


Коэффициент трения, A_0 = 0,01

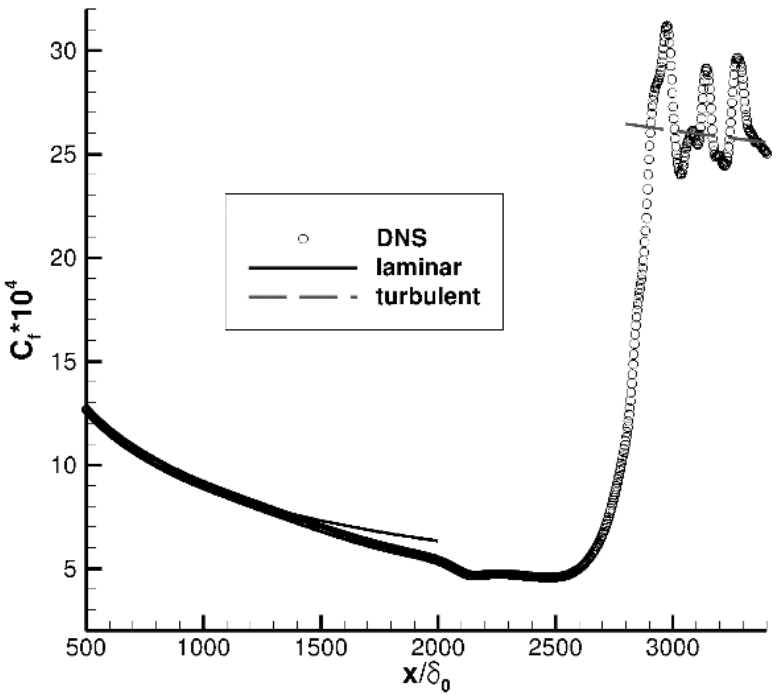


Коэффициент трения, A_0 = 0,001

Переход к турбулентности на плоской пластине без скачка. M=1,45, Re=700, Rex0 = 0,49·106, Tw/Te=1,356, A0 = 0,01

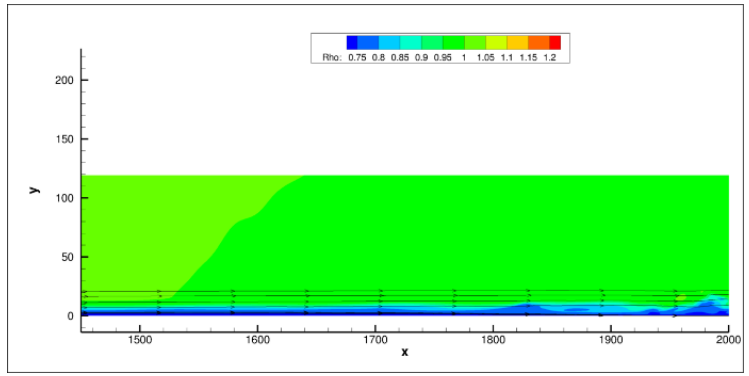


Поверхность Q критерия

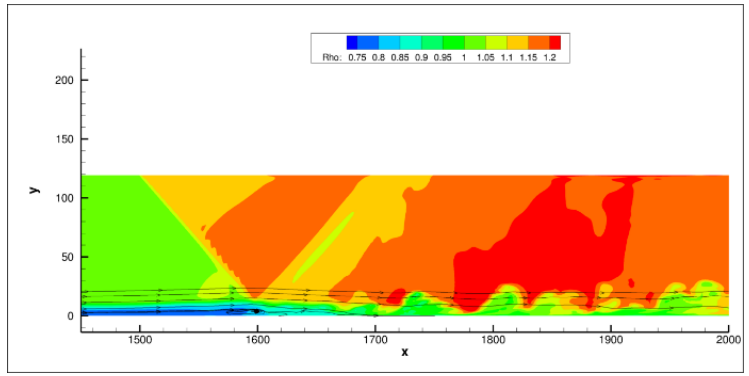


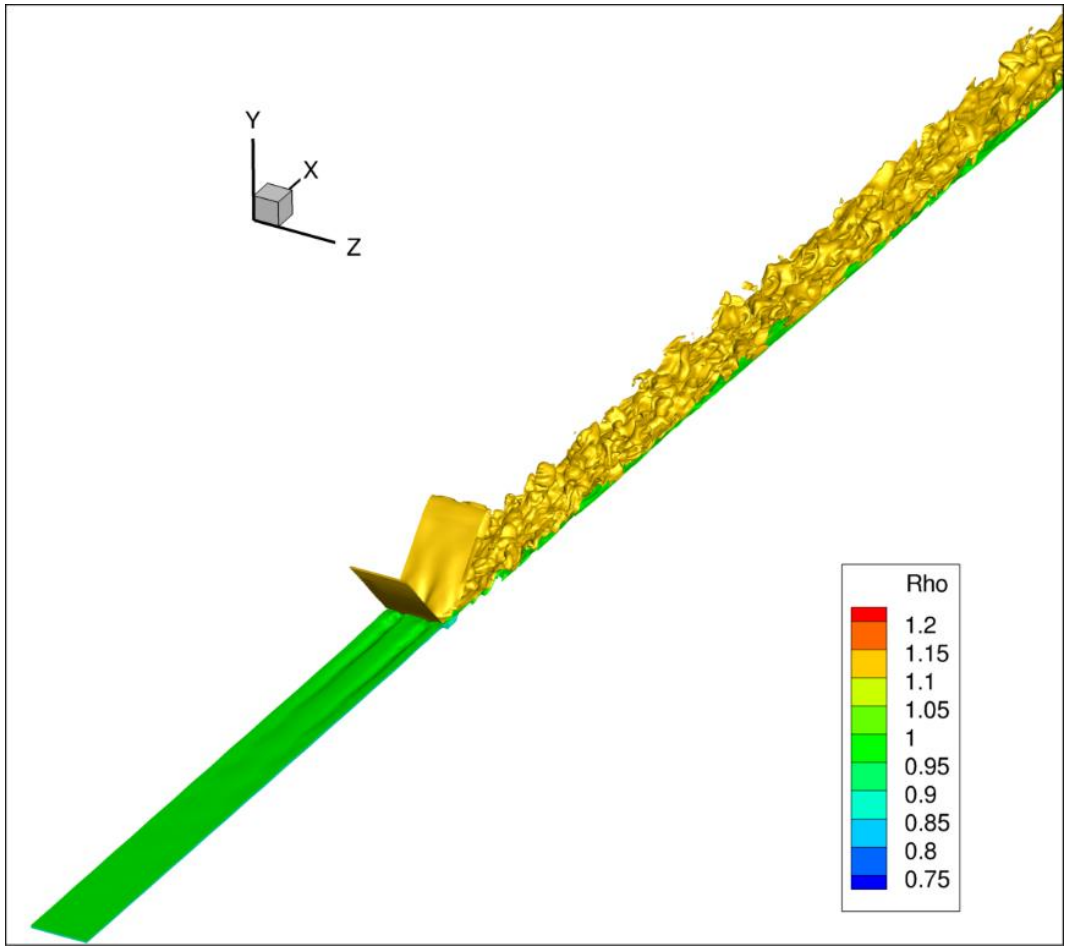
Изменение осредненного коэффициента трения вдоль поверхности пластины

Взаимодействие со скачком от клина с углом 3°, угол скачка 43,7°. $M = 1{,}45$, $Re = 700$, $Re_{x0} = 0{,}49 \cdot 10^6$, $T_w / T_\infty = 1{,}356$, $A_0 = 0{,}001$

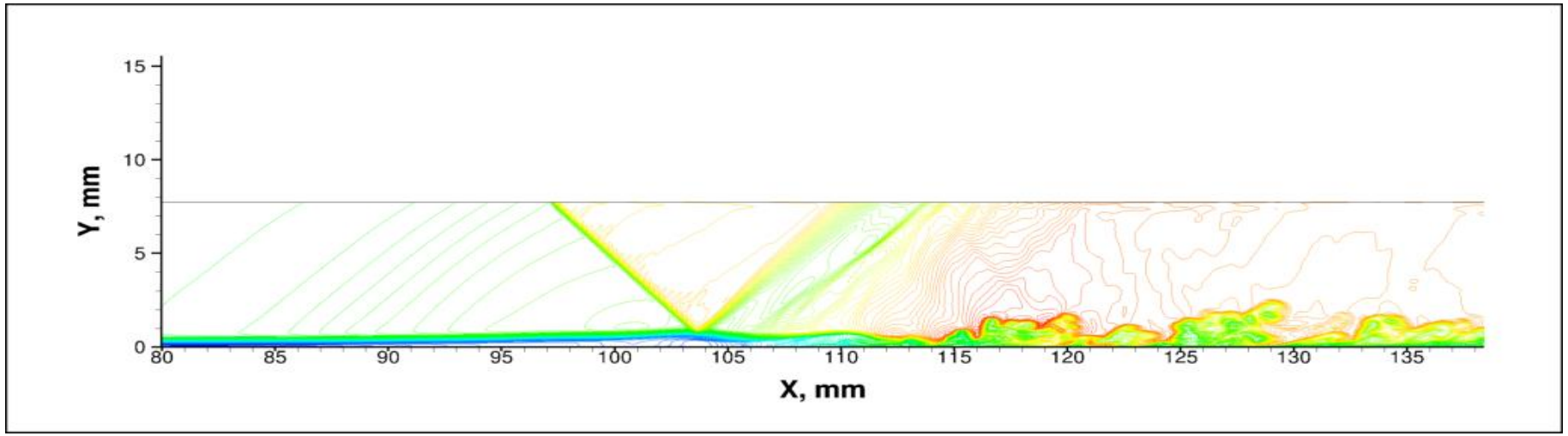


Возмущенный пограничный слой без скачка

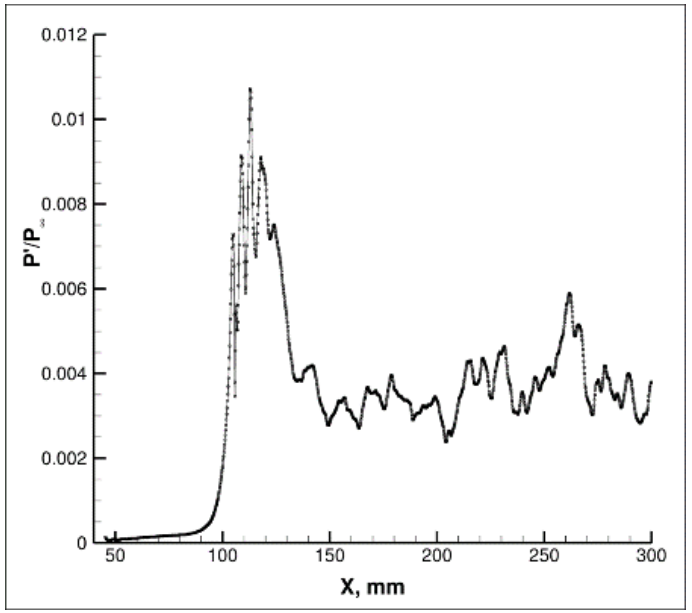




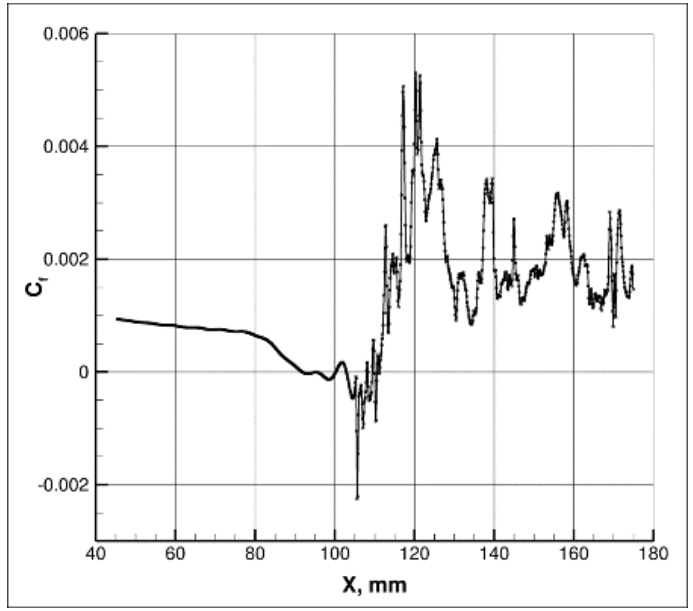
Взаимодействие с падающим скачком приводит к ламинарно-турбулентному переходу непосредственно за областью взаимодействия



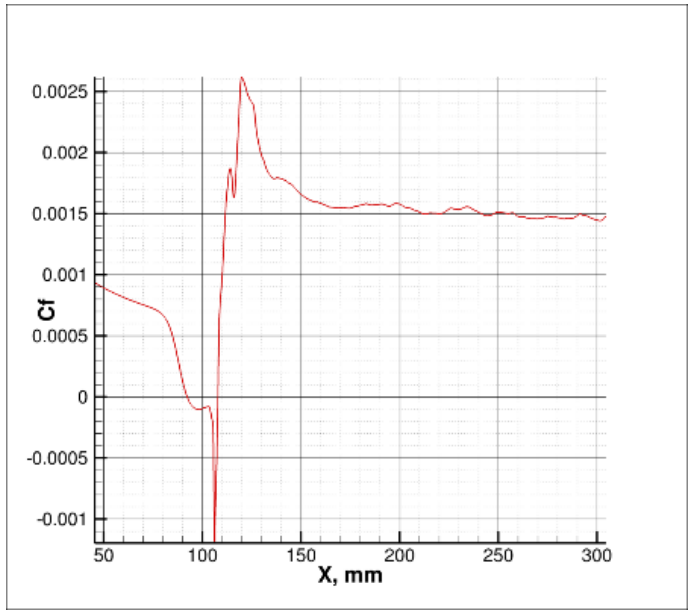
Изолинии плотности



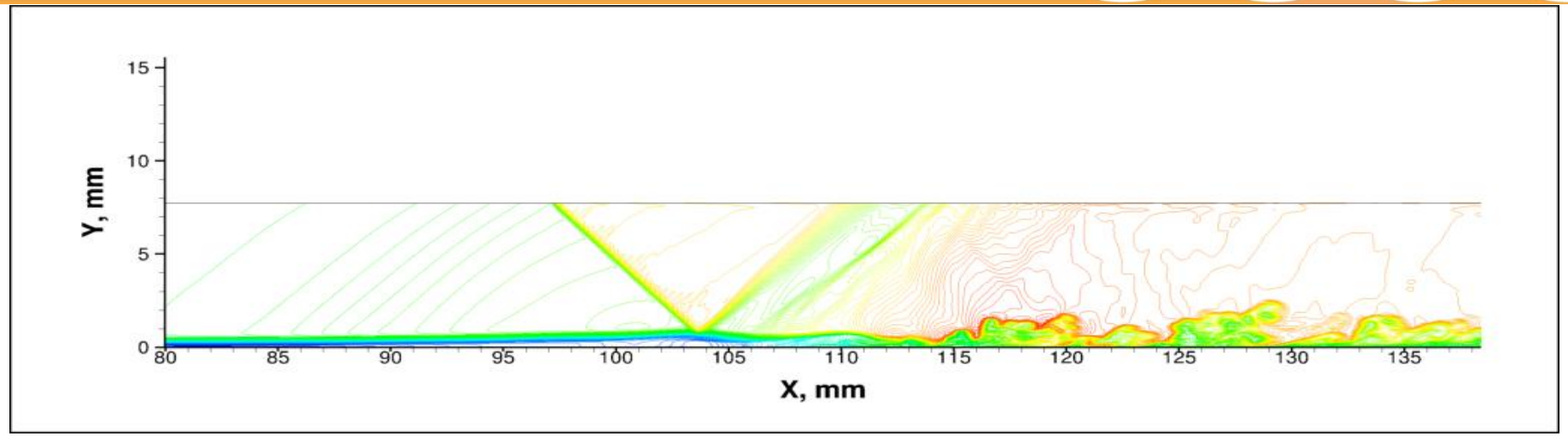
Распределение давления



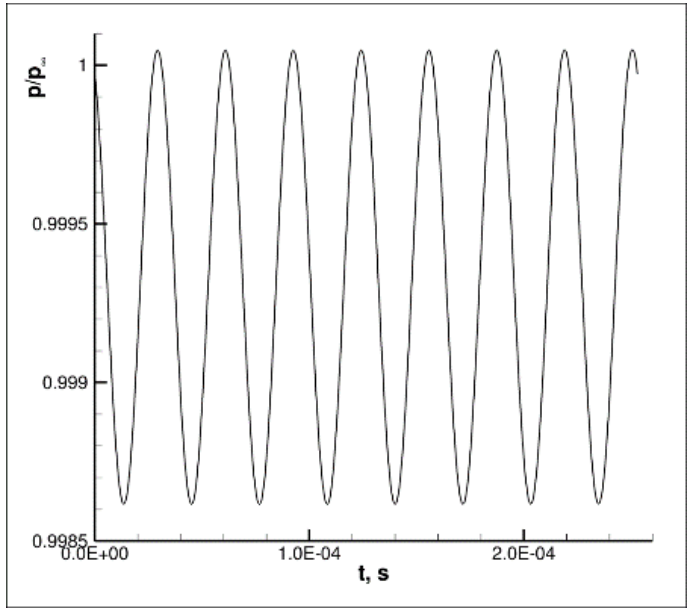
Коэффициент трения



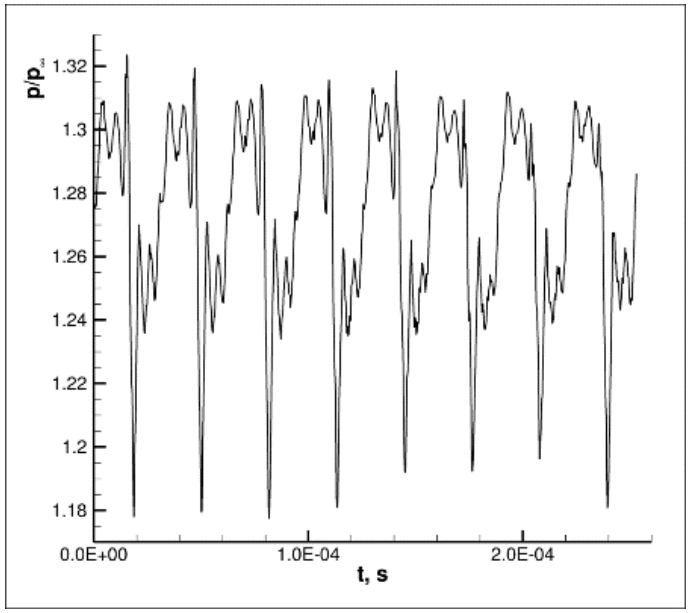
Осредненный коэффициент трения



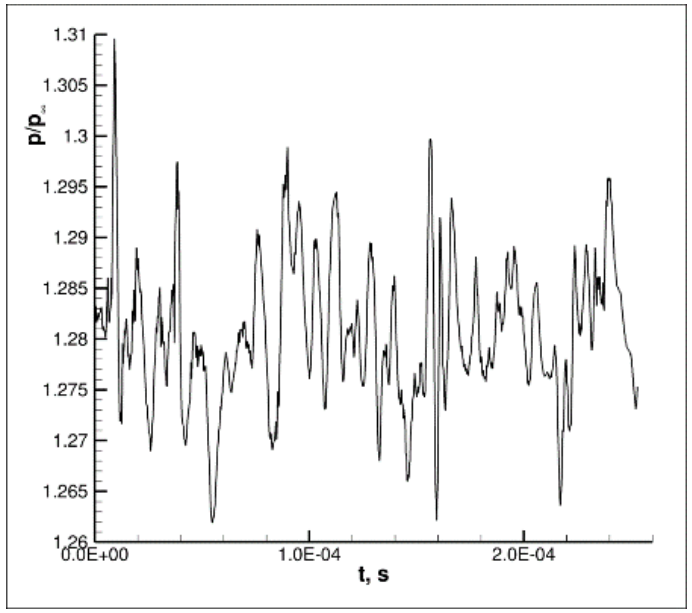
Изолинии плотности



x = 35 мм



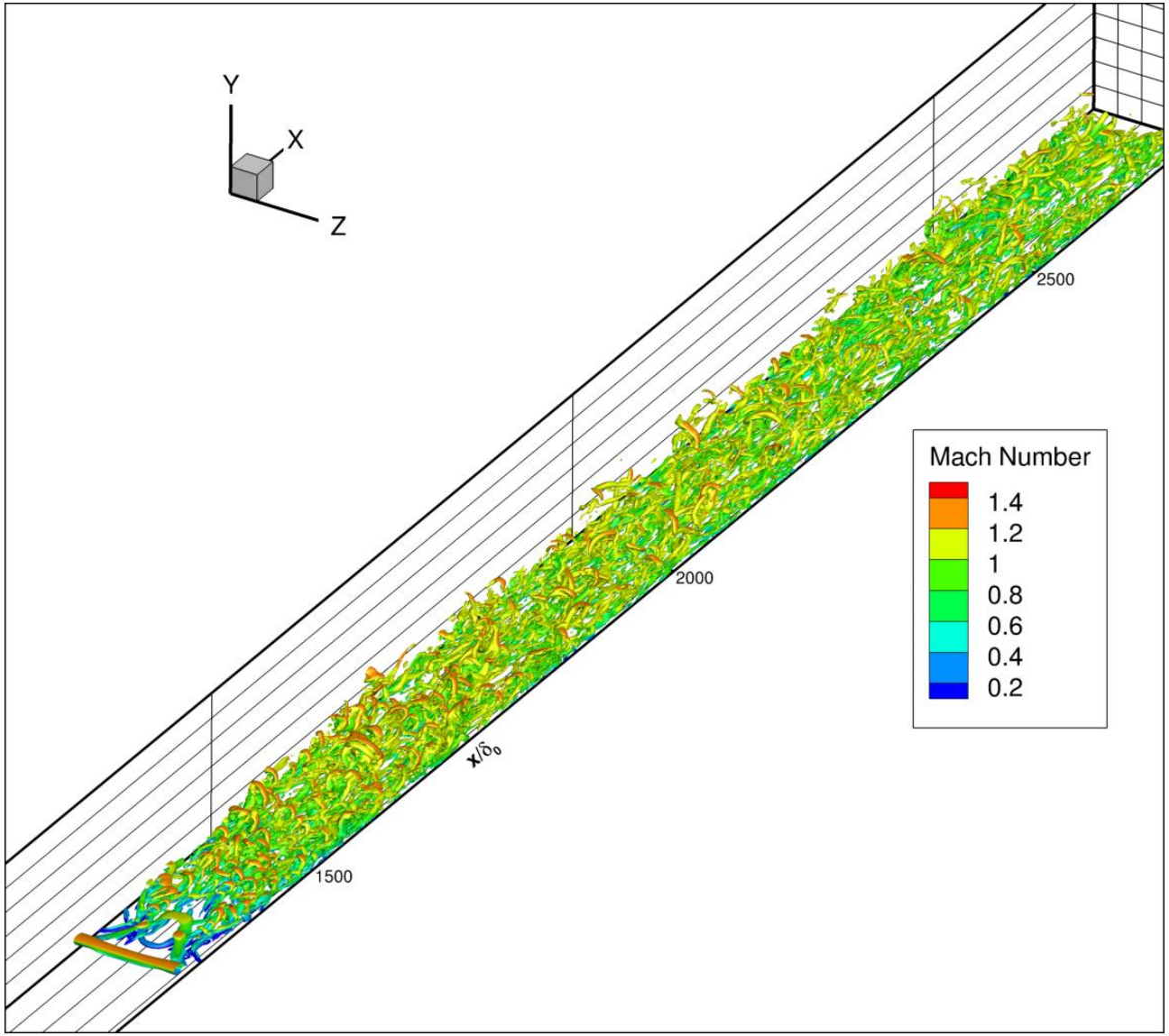
x = 113 мм



x = 178 мм

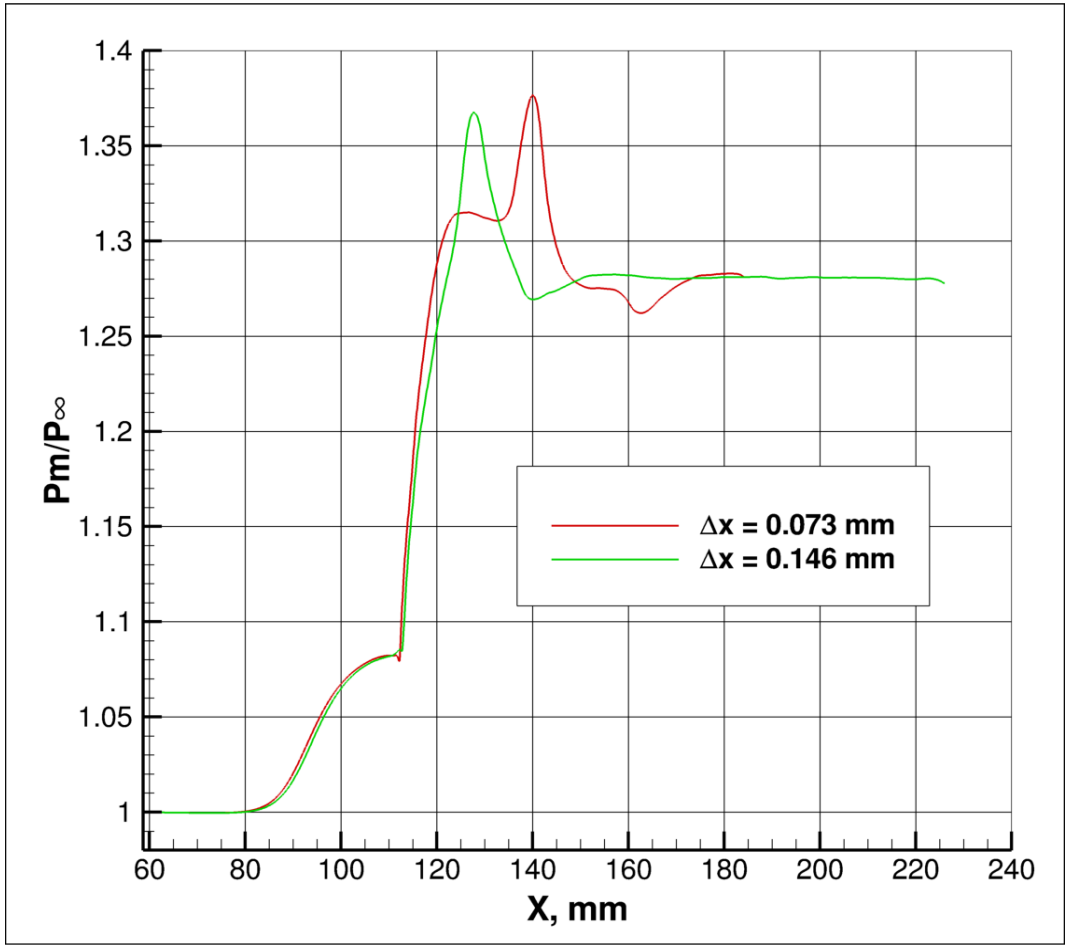
Осциллограммы давления

$M = 1{,}43$,
$Re = 700$,
$T_w / T_\infty = 1{,}346$,
$A_0 = 0{,}001$

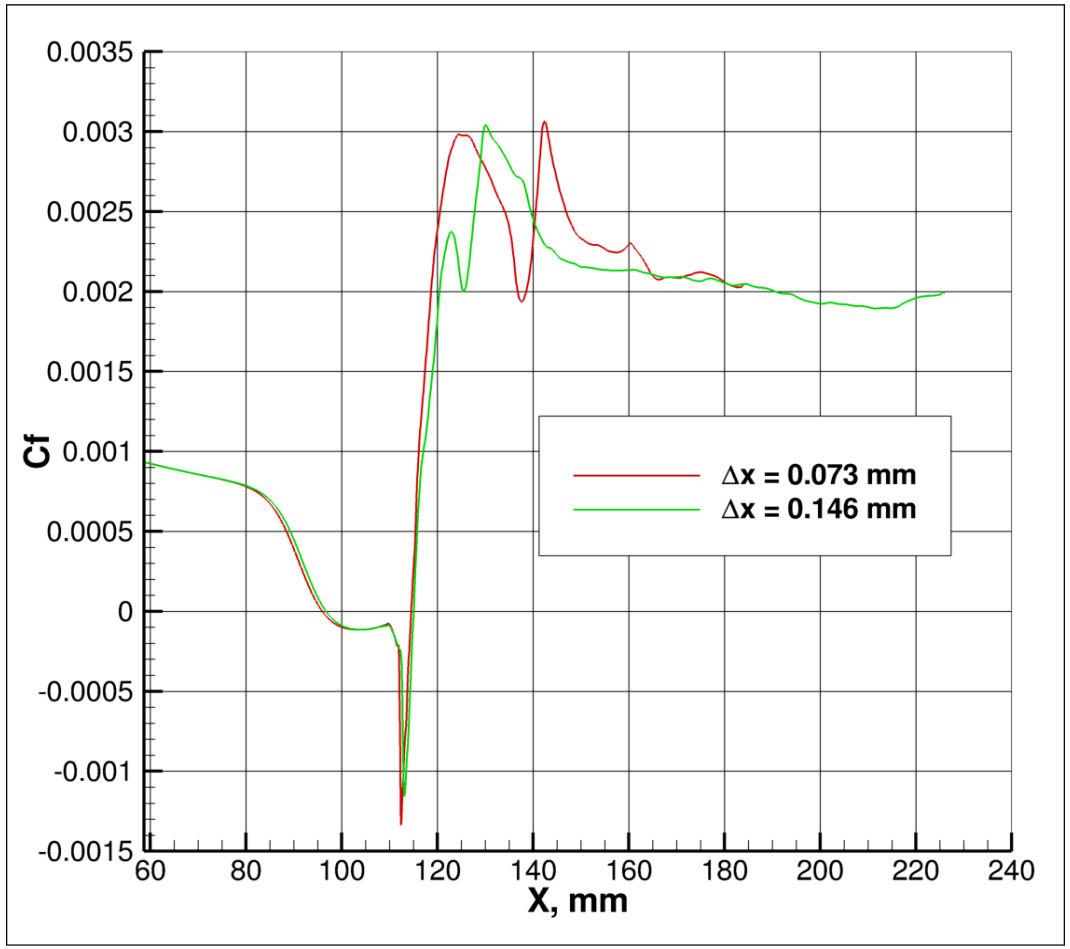


Изоповерхность Q критерия и число Маха

Распределения осредненных величин вдоль поверхности пластины



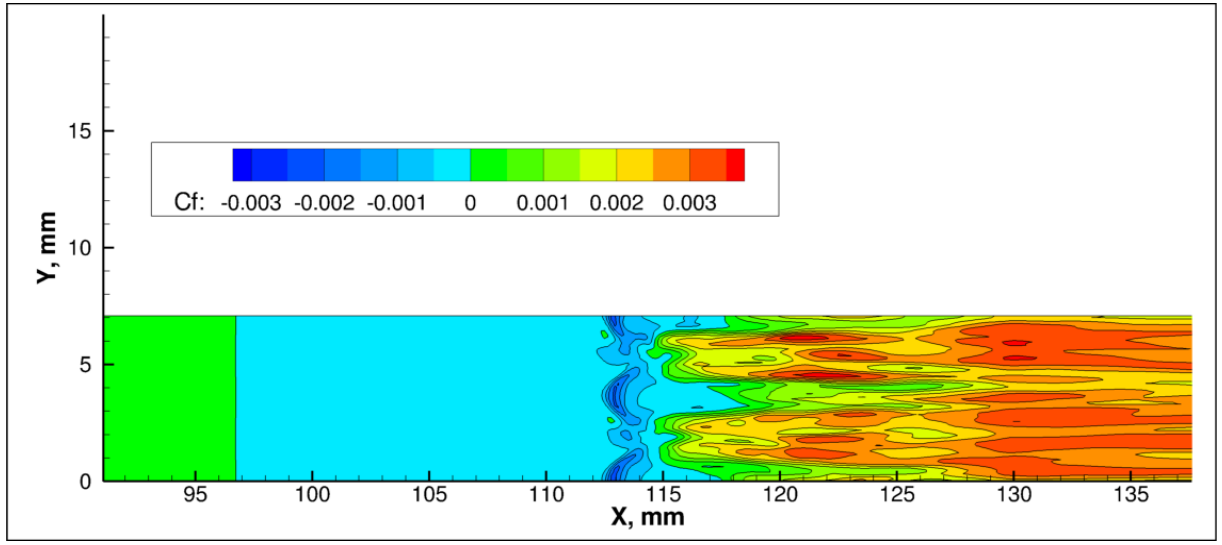
Давление



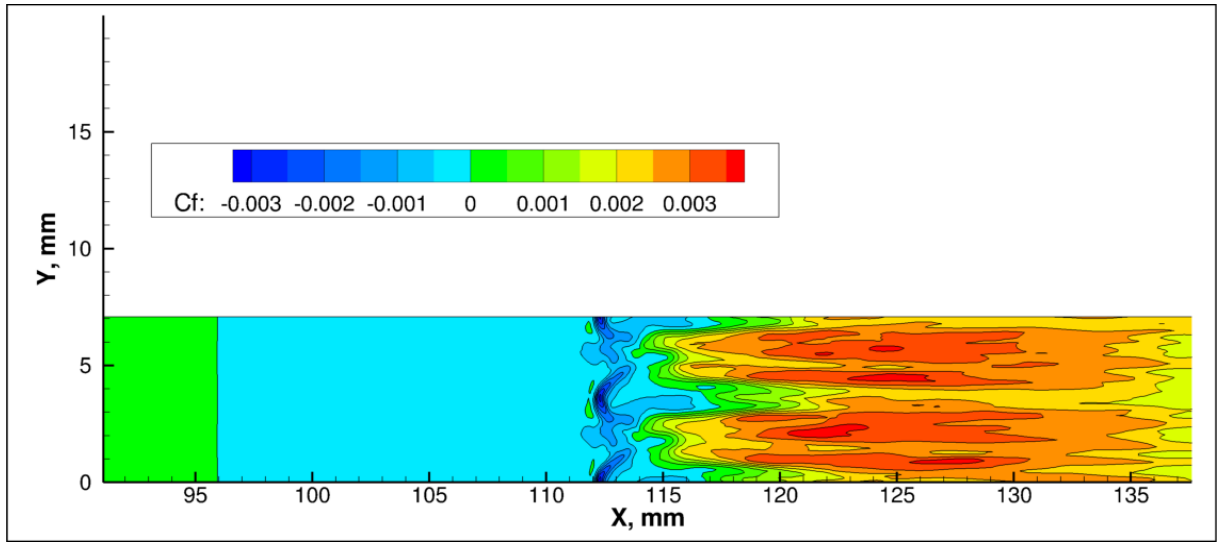
Коэффициент трения

Распределение по поверхности осредненного C_f

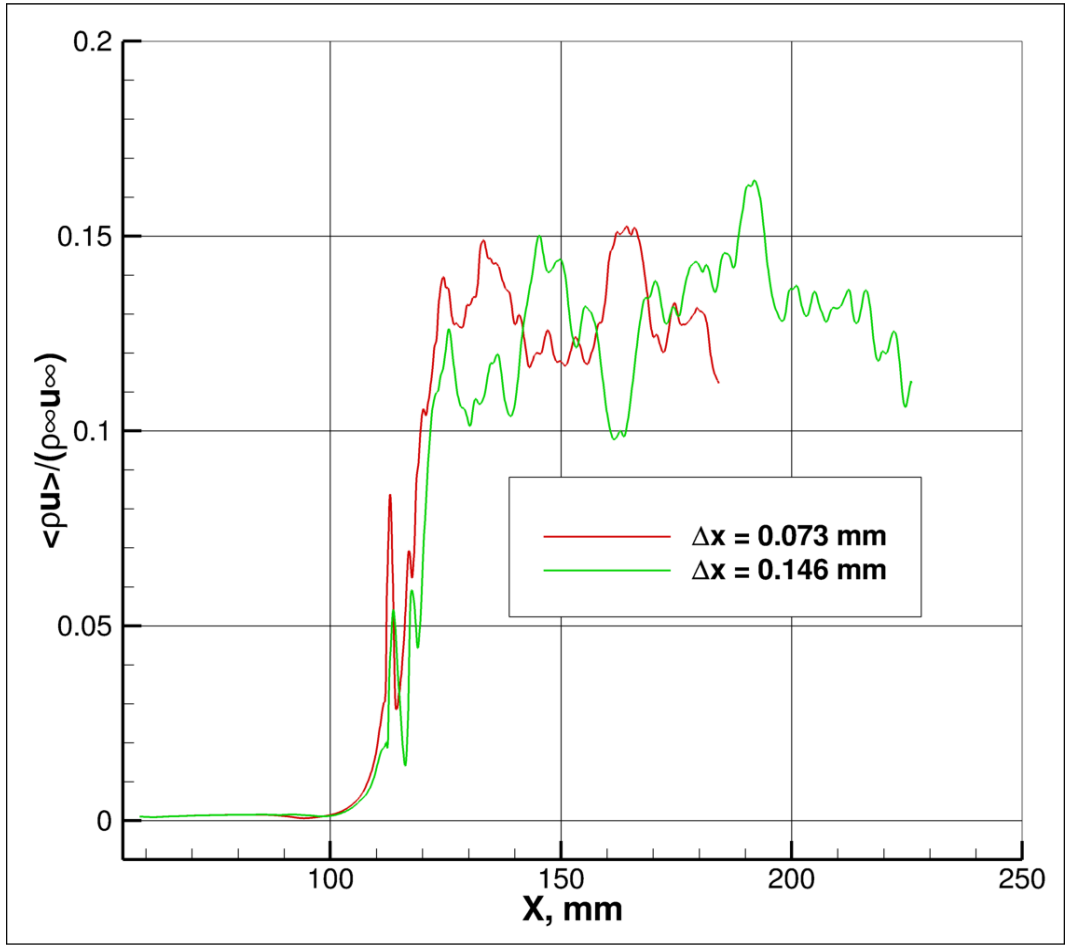
Сетка
Δx = 0,146 мм



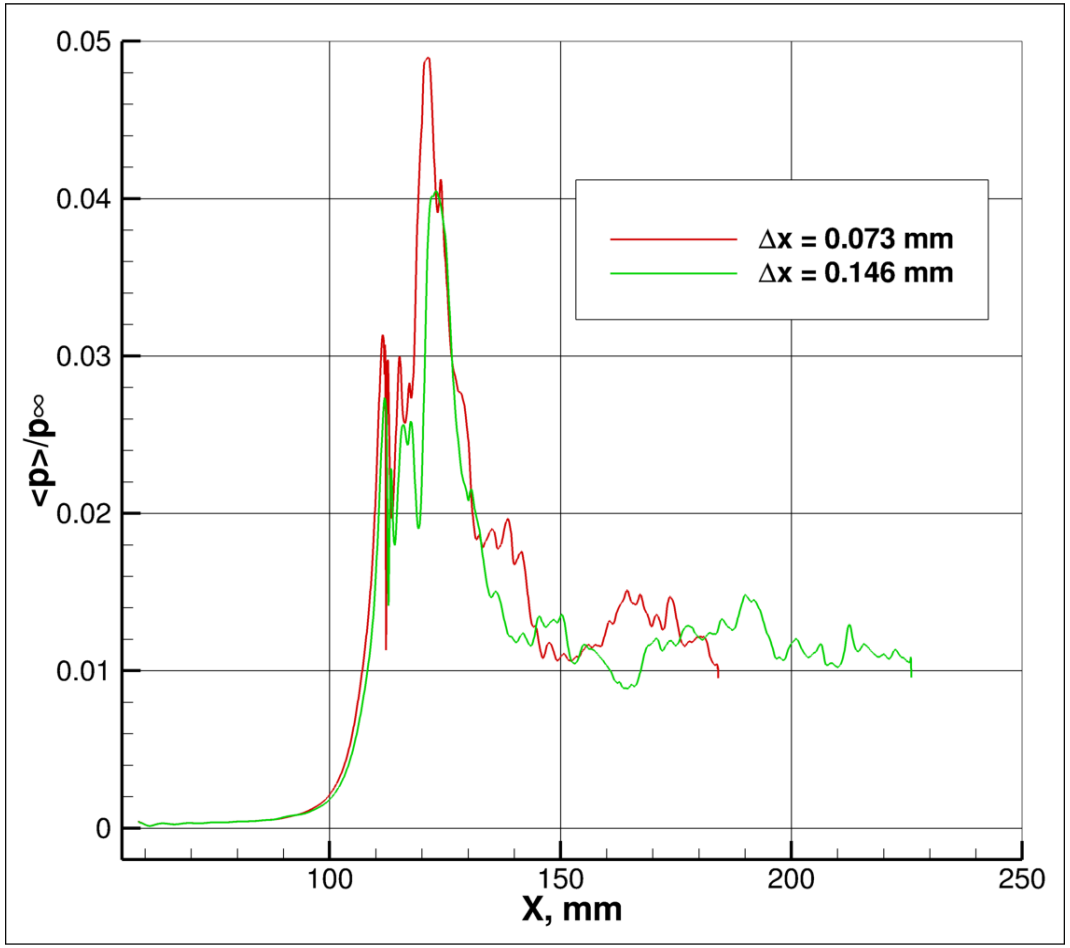
Сетка
Δx = 0,073 мм



Среднеквадратичные пульсации вдоль линии $z = L_z/2$ на высоте y = 0.14 мм



Пульсации массового расхода



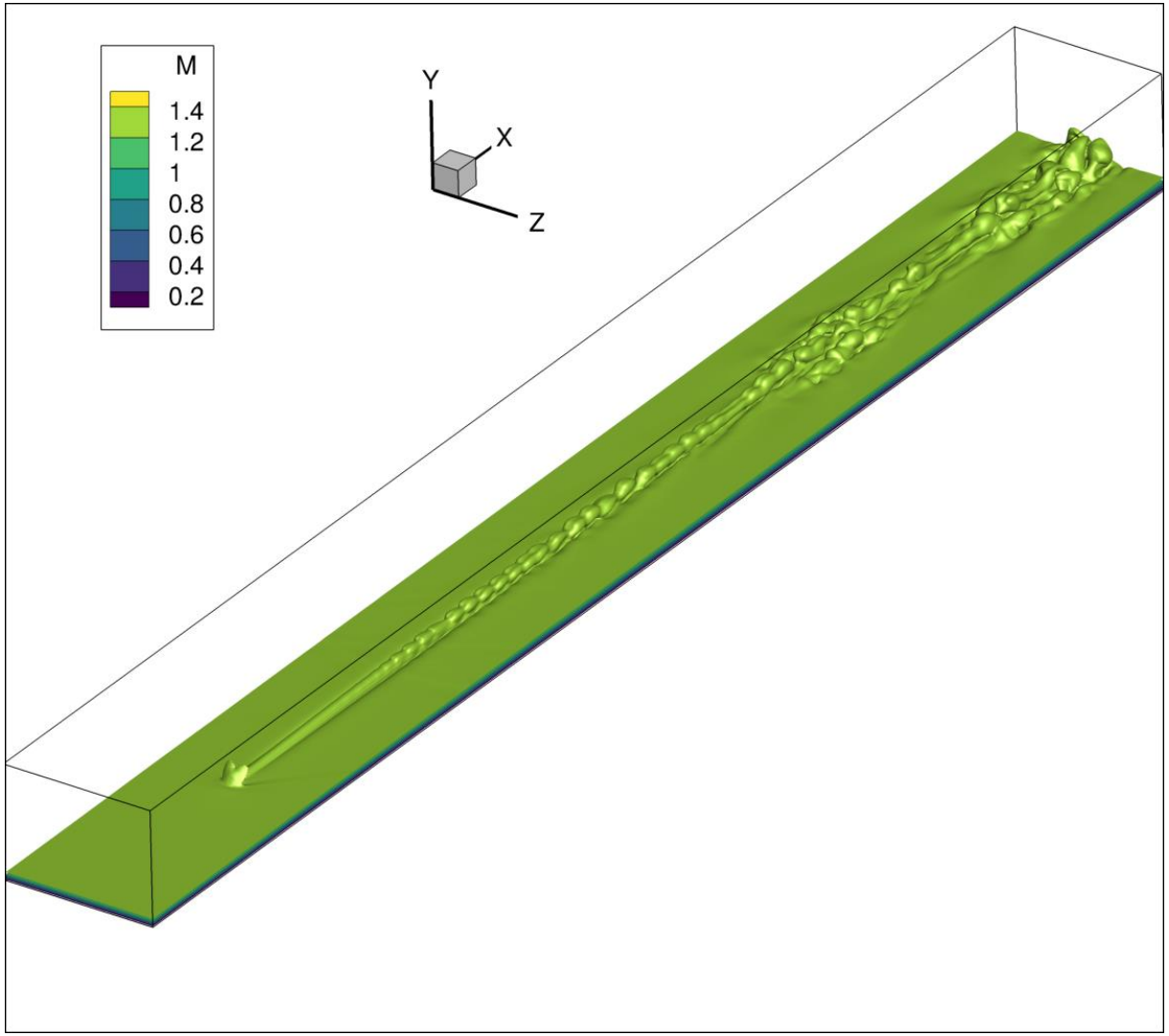
Пульсации давления

Численное моделирование течения в пограничном слое при наличии одиночной шероховатости на поверхности пластины

Возмущения во входном сечении не вводятся.

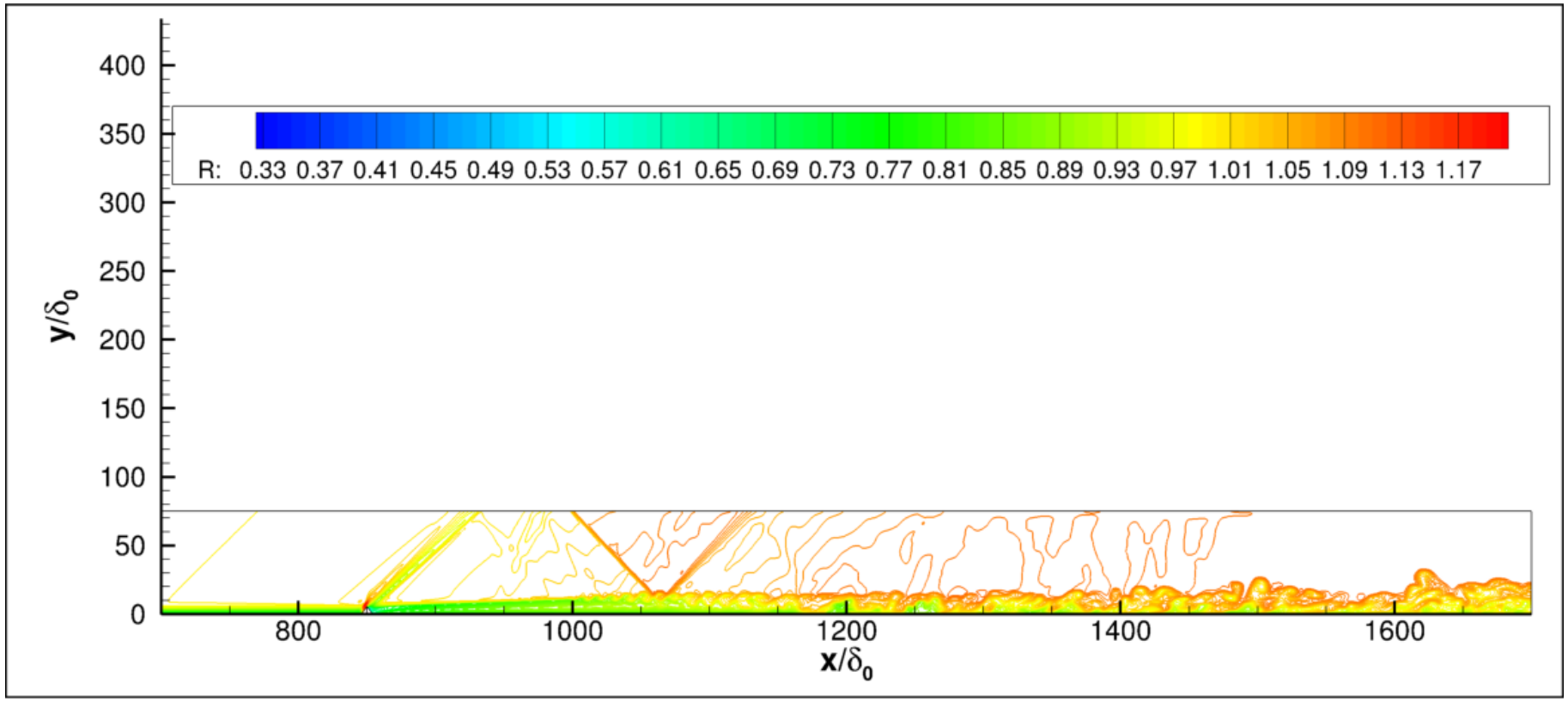
На некотором расстоянии от входной границы размещается одиночный элемент шероховатости в виде , где r – расстояние от центра элемента в плоскости (x, z).

Высота h и радиус R элемента варьируются.



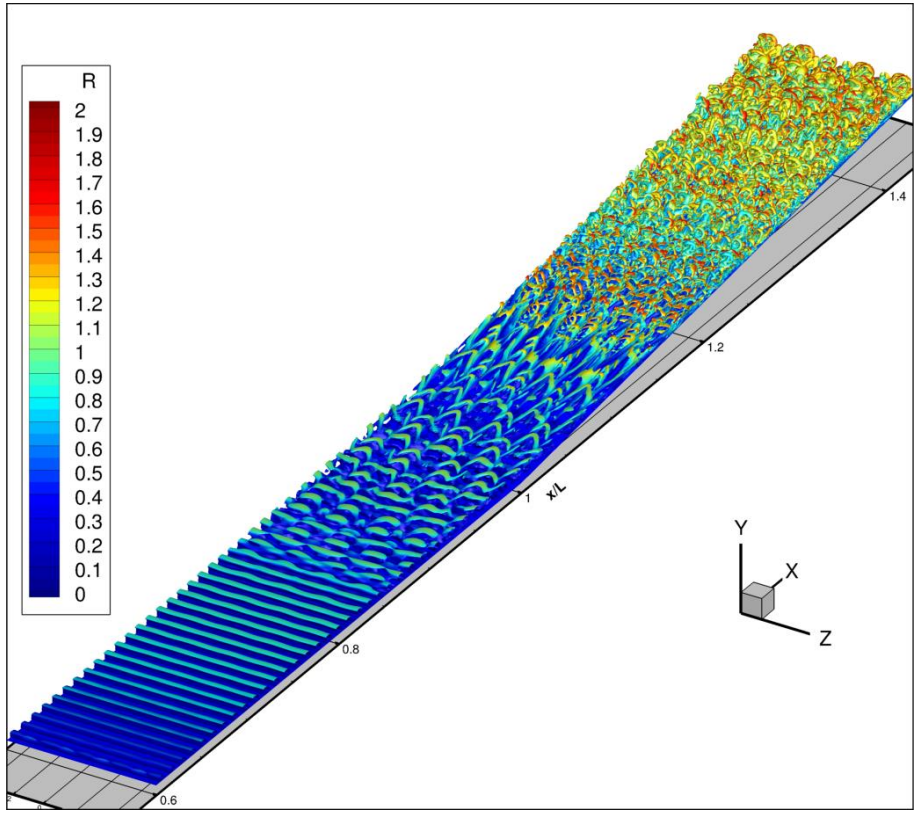
SWBLI и ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое на пластине с одиночным элементом шероховатости

M = 1,45, Re = 700, теплоизолированная стенка,
элемент шероховатости высотой $h/\delta_0 = 4$ располагается при $x/\delta_0 = 850$

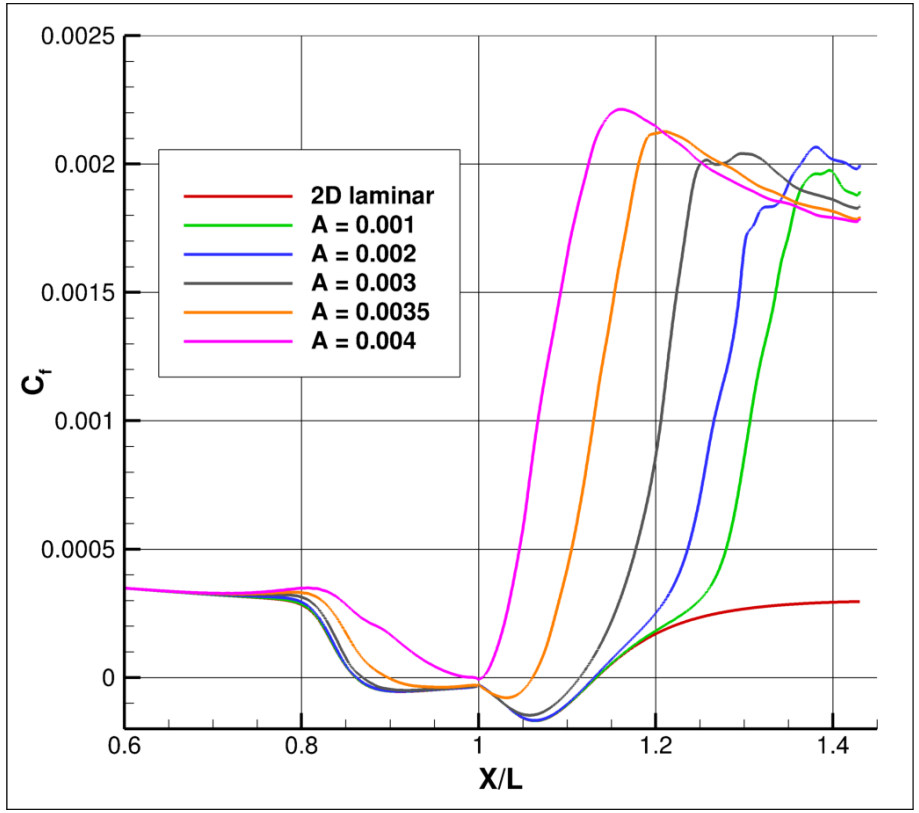


Изолинии плотности в продольном сечении

Моделируется течение над рампой сжатия с углом 5,5°. M = 5,373, Re = $5{,}67\cdot10^6$, Re_1=$17{,}93\cdot10^6$ м$^{-1}$, T_∞ = 74,2 К, T_w = 300 К. На входе возбуждались двумерная (χ=0) волна второй моды и трехмерная (χ=±66°) волна первой моды возмущений линейной устойчивости. При ламинарном течении перед рампой сжатия происходит отрыв потока с образованием рециркуляционной зоны. Проведено исследование влияния возмущенного состояния на входной границе на возбуждение наиболее опасных неустойчивых возмущений пограничного слоя, их дальнейшую эволюцию и реализацию ламинарно-турбулентного перехода.

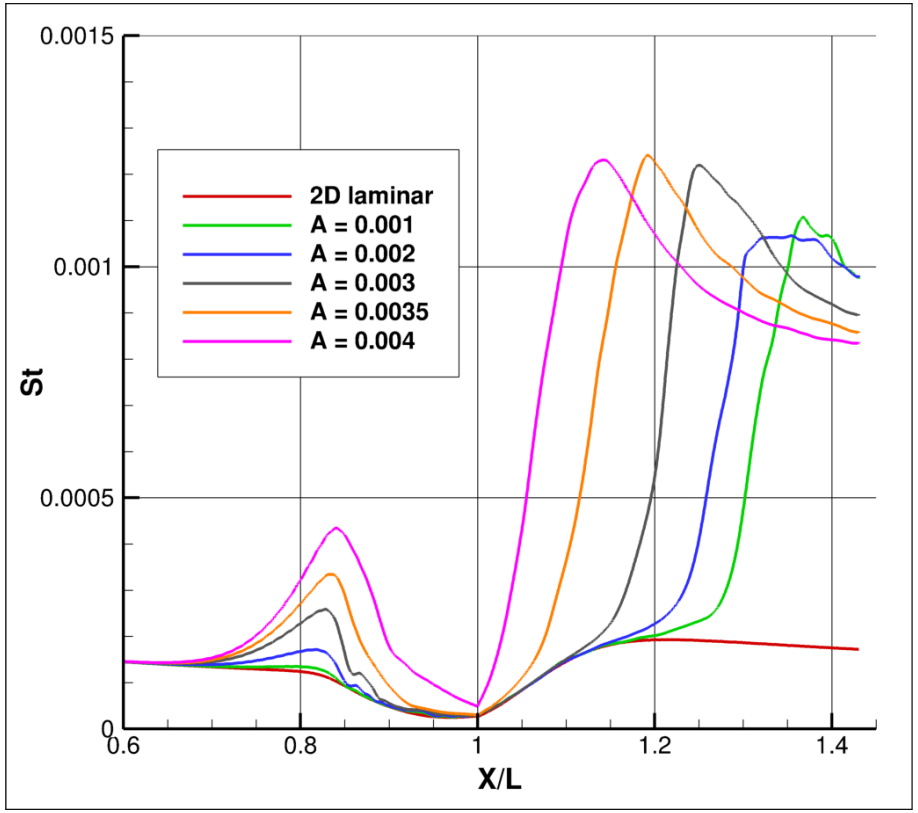


Изоповерхности Q критерия и уровни плотности. Расчет кодом HyCFS с 40 млн ячеек. A = 0.0035

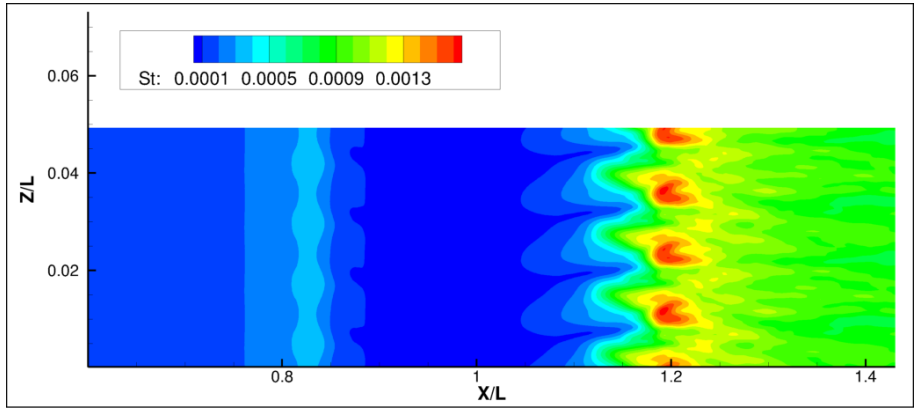


Распределения осредненных коэффициентов трения при различных амплитудах возмущения

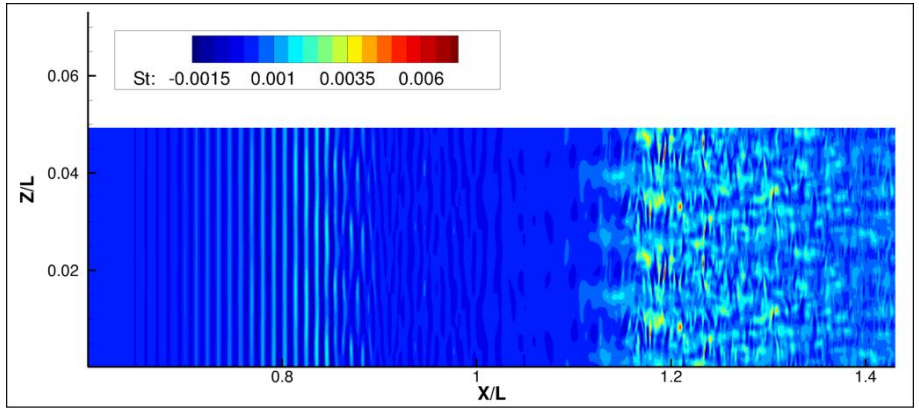
С помощью прямого численного моделирования получены данные по мгновенным и усредненным значениям тепловых потоков и поверхностного трения в переходном пограничном слое на рампе сжатия.



Осредненные по времени и координате Z тепловые потоки при различных амплитудах возмущения.



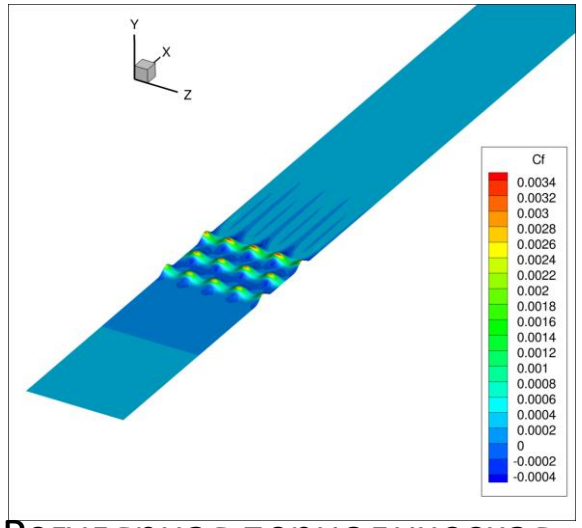
Распределение осредненного по времени теплового потока при A=0,0035



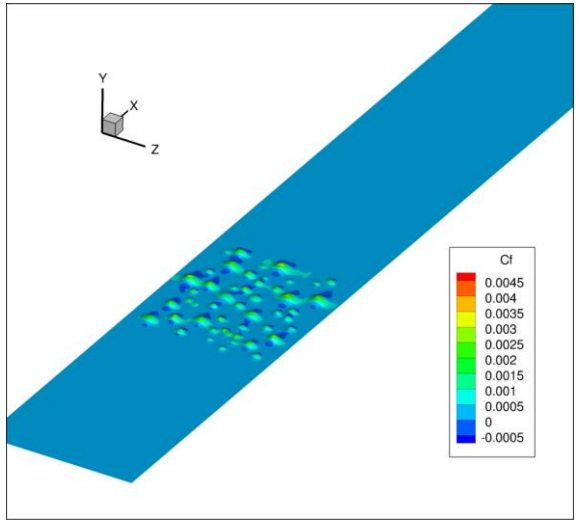
Распределение мгновенного теплового потока при A=0,0035

Проведено исследование влияния шероховатости поверхности на характеристики пограничного слоя на рампе сжатия.
Рассмотрена регулярная периодическая и случайно-распределенная шероховатости. Размер элементов шероховатости h варьируется от $h = 2\,\delta$ до $h = 10\,\delta$, где δ - блазиусовская толщина пограничного слоя во входном сечении. $\delta^{99} = 13{,}5\,\delta$.
Моделируется течение на рампе сжатия с углом 5,5°. Параметры течения соответствуют эксперименту [1] для передней части аппарата Hyper-X:
$M = 5{,}373$, $Re = 5{,}67\cdot10^6$, $Re_1 = 17{,}93\cdot10^6\ м^{-1}$, $T_\infty = 74{,}2$ К, $T_w = 300$ К.
В ламинарном течении перед рампой сжатия происходит отрыв потока с образованием рециркуляционной зоны.

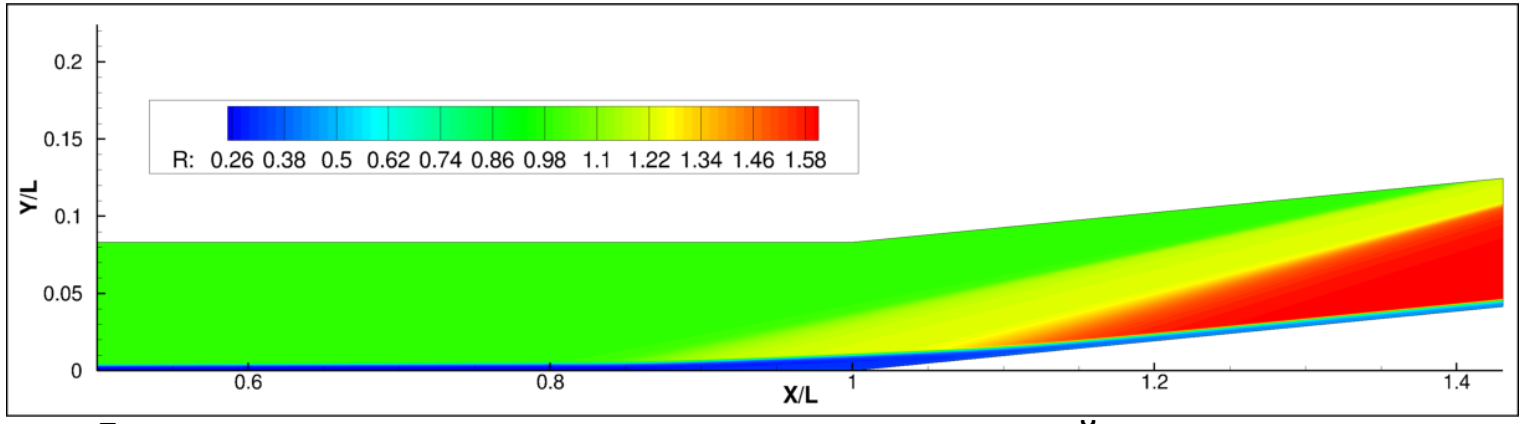
[1] Berry et al., DiFulvio, Kowalkowski. Forced Boundary Layer Transition on X-43 (Hyper-X) in NASA LaRC 20-Inch Mach 6 Air Tunnel. NASA TM-2000-210316, Aug. 2000.



Регулярная периодическая шероховатость. $h = 5\delta$

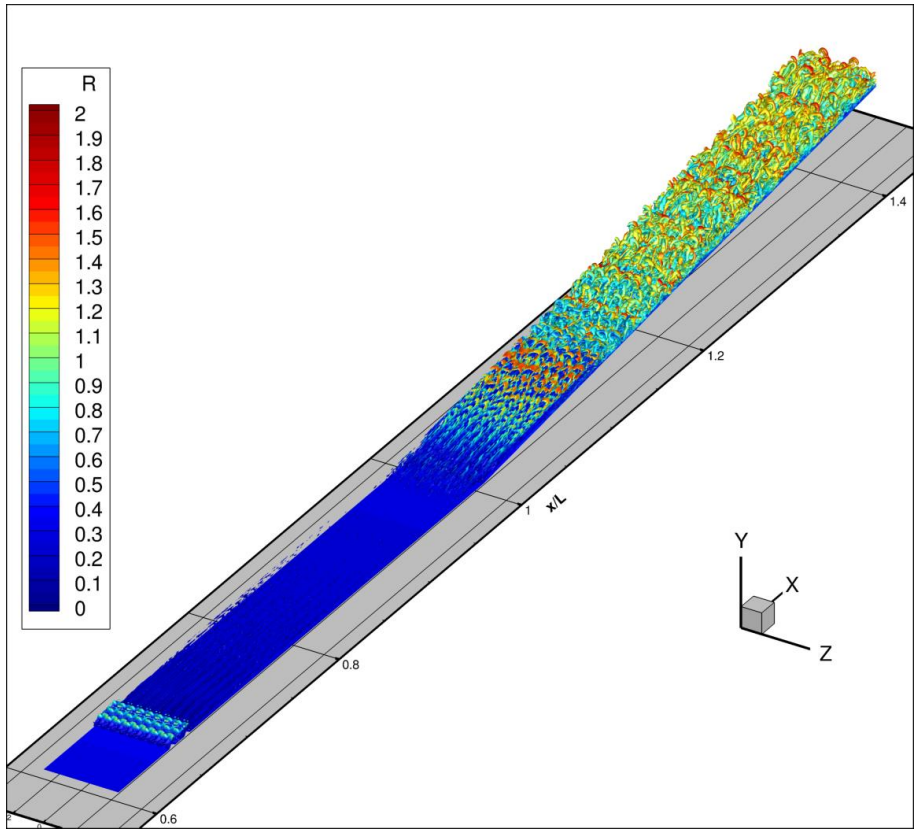


Случайно-распределенная шероховатость $h_{max} = 5\delta$

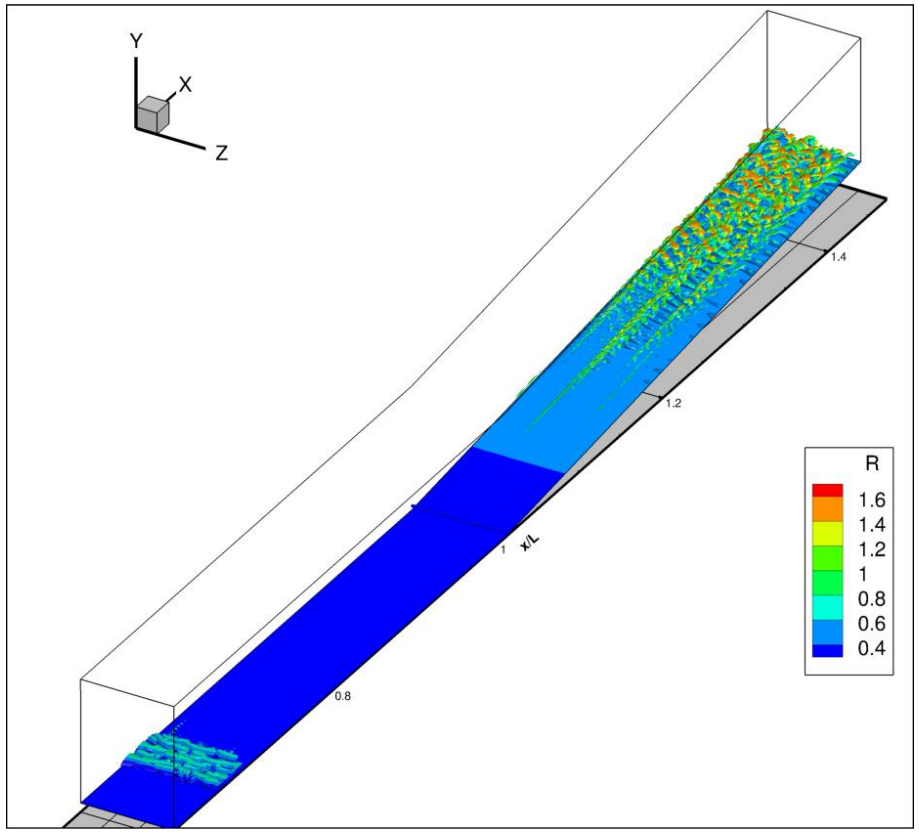


Ламинарное невозмущенное течение на гладкой поверхности

Регулярная шероховатость с максимальным рассмотренным размером h = 10 δ оказывает значительное возмущающее действие на течение, что приводит к ламинарно-турбулентному переходу на рампе сжатия. При использовании случайной шероховатости с h_{max} = 5δ в течении наблюдается начало ламинарно-турбулентного перехода вблизи выходной границы области.

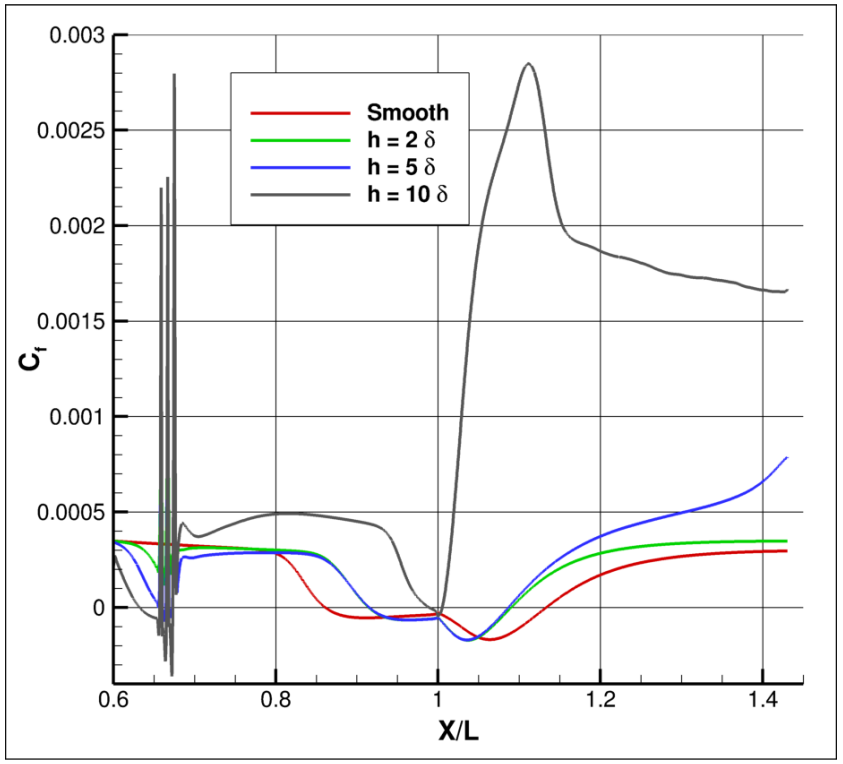


Поверхность Q-критерия и уровни плотности при использовании регулярной шероховатости с размером h = 10 δ

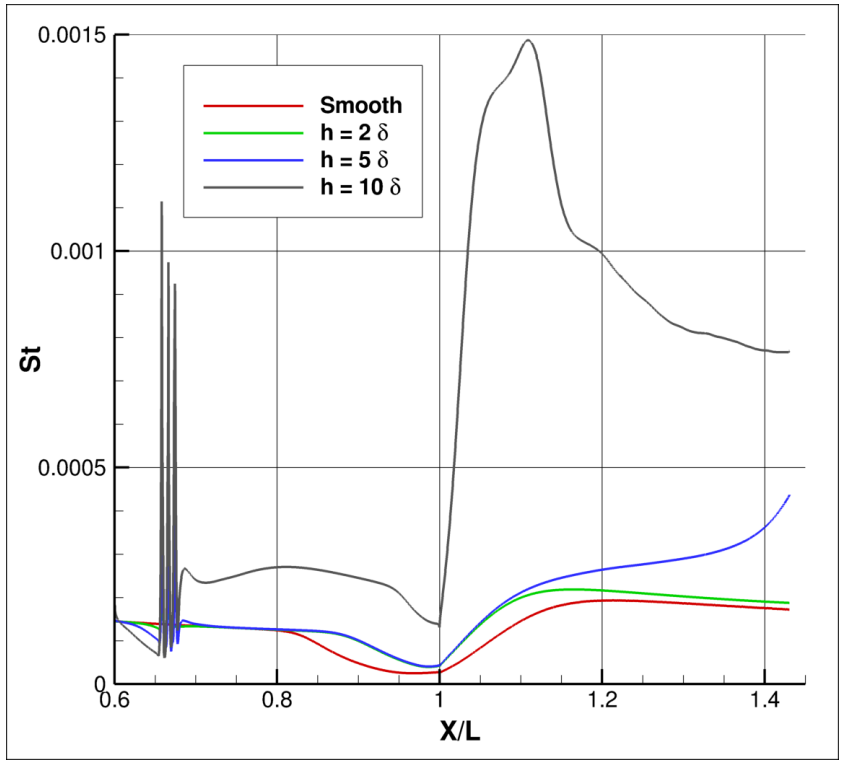


Поверхность Q-критерия и уровни плотности при использовании случайно-распределенной шероховатости с максимальным размером h = 5δ

С помощью прямого численного моделирования получены распределения поверхностного трения и тепловых потоков в переходном пограничном слое на рампе сжатия, которые показывают существенное влияние параметров шероховатости на размер и положение отрывной зоны.



Распределения осредненных по времени и координате *z* коэффициентов трения при различных параметрах шероховатости *h*



Распределения осредненных по времени и координате Z чисел Стантона при различных параметрах шероховатости h

Выводы

- С помощью прямого численного моделирования исследуется влияние набегающих возмущений пограничного слоя на динамику взаимодействия ударной волны с пограничным слоем (SWBLI).
- Используются два различных подхода для генерации набегающих возмущений пограничного слоя. В первом подходе трехмерные неустойчивые волны теории линейной устойчивости (LST) накладываются на автомодельный профиль пограничного слоя на входной границе.
- Падающая ударная волна порождает неблагоприятный градиент давления и образование зоны отрыва, что приводит к увеличению пульсаций в пограничном слое, их быстрому вхождению в нелинейный режим и, как следствие, ламинарно-турбулентному переходу.
- Положение ламинарно-турбулентного перехода зависит от амплитуды A набегающего возмущения и может существенно смещаться вверх по течению вплоть до зоны SWBLI с увеличением A.
- Во втором подходе возмущения на входной границе не накладываются. Вместо этого на некотором расстоянии от границы на поверхность пластины помещается одиночный элемент шероховатости.
- Вихревые структуры в следе за элементом шероховатости превращаются в интенсивные продольные вихри, взаимодействующие с зоной SWBLI.

Выводы

- Проведено моделирование течения над рампой сжатия с углом 5,5°. Число Маха потока M = 5,373, число Рейнольдса Re = $5{,}67 \cdot 10^6$, $Re_1 = 17{,}93 \cdot 10^6$ м$^{-1}$, температура потока T_∞ = 74,2 К, температура стенки T_w = 300 К. На входе возбуждались двумерная (χ=0) волна второй моды и трехмерная (χ=±66°) волна первой моды возмущений линейной устойчивости. При ламинарном течении перед рампой сжатия происходит отрыв потока с образованием рециркуляционной зоны.
- Проведено исследование влияния возмущенного состояния на входной границе на возбуждение наиболее опасных неустойчивых возмущений пограничного слоя, их дальнейшую эволюцию и реализацию ламинарно-турбулентного перехода.
- Проведено исследование влияния шероховатости поверхности на характеристики пограничного слоя на рампе сжатия. Рассмотрена регулярная периодическая и случайно-распределенная шероховатости.
- Регулярная шероховатость с максимальным рассмотренным размером h = 10 δ оказывает значительное возмущающее действие на течение, что приводит к ламинарно-турбулентному переходу на рампе сжатия. При использовании случайной шероховатости с $h_{max} = 5\delta$ в течении наблюдается начало ламинарно-турбулентного перехода вблизи выходной границы области.

Спасибо за внимание!