

CFDWeekend-2015. Москва, ИТМ РАН, 28-29 ноября 2015 г.

**Комплекс программ CFS3D/НyCFS
для численного решения задач
сверхзвуковой аэродинамики на компьютерах
с параллельной и гибридной архитектурой**

А.Н. Кудрявцев



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



Новосибирский
государственный университет

CFS3D

- ❑ Комплекс исследовательских программ, предназначенный для решения задач сверхзвуковой аэродинамики с помощью современных схем сквозного счета
- ❑ **Разработчики:** *А.Н. Кудрявцев, Д.В. Хотяновский, Р.Д. Рахимов, Д.Б. Эпштейн, А.А. Шершнев (ИТПМ СО РАН), D.M. Davidenko (ICARE, Orléans)*
- ❑ **Внешние пользователи:** *Ю.П. Гунько, Т.В. Поплавская, Г.В. Шоев, С.В. Кирилловский, С.П. Борисов (ИТПМ СО РАН), A.-S. Mouronval (INSA de Rouen), J.-D. Parisse (IUSTI, Marseille)*
- ❑ **Решаемые уравнения:** нестационарные уравнений Эйлера и Навье-Стокса для инертной сплошной среды, стационарные уравнения Эйлера, уравнения Эйлера для химически реагирующей смеси, модельные кинетические уравнения для функции распределения
- ❑ **Язык:** Fortran 77/Fortran 90
- ❑ **Расчетные сетки:** структурированные многоблочные, неструктурированные треугольные и тетраэдральные
- ❑ **Параллелизация:** геометрическая декомпозиция, библиотека MPI

Пространственная аппроксимация на структурированных сетках

□ MUSCL TVD схемы

- Реконструкция примитивных или характеристических переменных с помощью формул 2-го/3-го (van Leer) и 4-го/5-го (Yamamoto & Daiguji) порядка с различными ограничителями (*minmod, van Leer, van Albada, superbee, Koren*);
- Вычисление невязких потоков путем приближенного решения задачи о распаде разрыва, большое количество различных солверов (*точный годуновский, FDS Roe and Osher-Solomon, FVS van Leer and Steger-Warming, hybrid AUSM/van Leer, Marquina, HLLC и его модификации – HLLC, HLLC, EFM и др.*);
- Центральные разности второго порядка для диффузионных членов

□ ENO/WENO схемы

- Конечноразностные ENO схемы 2-го и 3-го порядка, WENO схемы 3-го и 5-го порядков, MP5, MPWENO и WENO-Z схемы;
- Различные способы расщепления потоков (*Roe, local, stencil-based and global Lax-Friedrichs splittings*);
- Аппроксимация диффузионных членов центральными разностями 4-го порядка на компактном шаблоне

Другие особенности

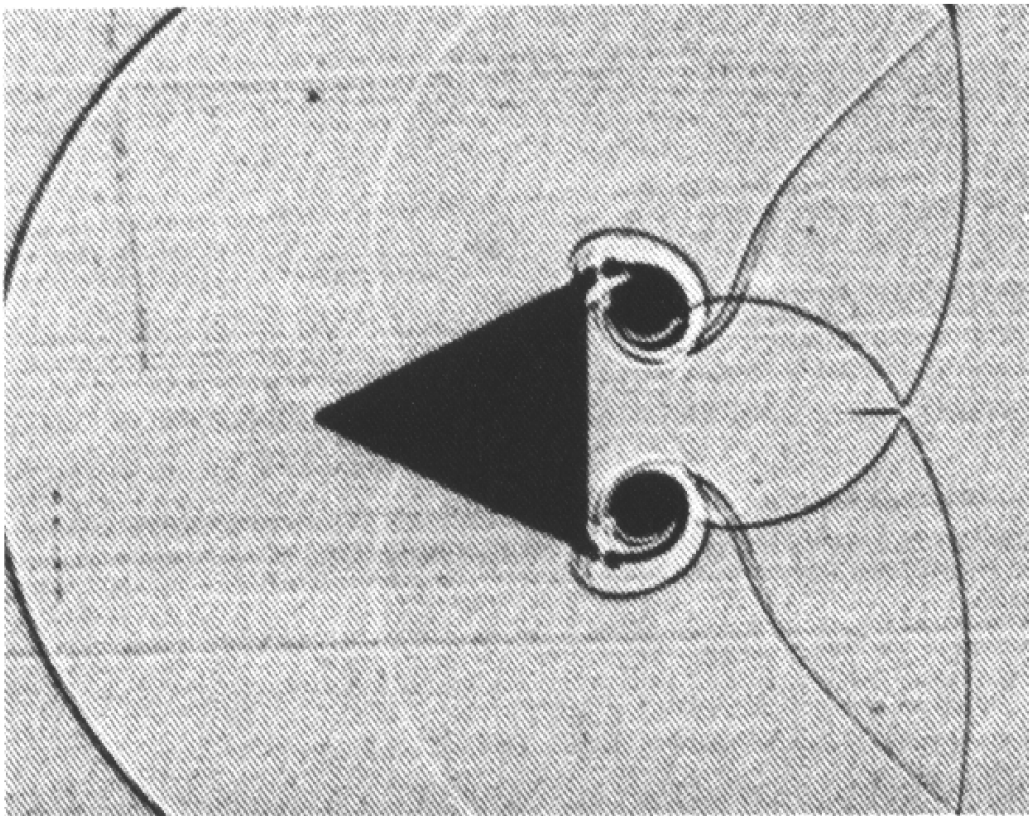
- ❑ **Интегрирование по времени:** Явные схемы (*TVD* схемы Рунге-Кутты, схемы Рунге-Кутты-Гилла и Рунге-Кутты-Джеймсона, 6-стадийная SSP схема 5-го порядка)
- ❑ **Построение расчетных сеток:** любой доступный генератор структурированных сеток, собственные возможности весьма ограничены – трансфинитная интерполяция, эллиптический генератор, генератор ортогональных сеток по методу Ryskin & Leal
- ❑ **Для моделирования течений разреженных газов** реализованы граничные условия с частичным скольжением и скачком температуры на поверхности
- ❑ **Специальные утилиты** для обработки данных расчета и построения численных шпирен-визуализаций, интерферограмм и теневых картинок

Чего нет в CFS3D

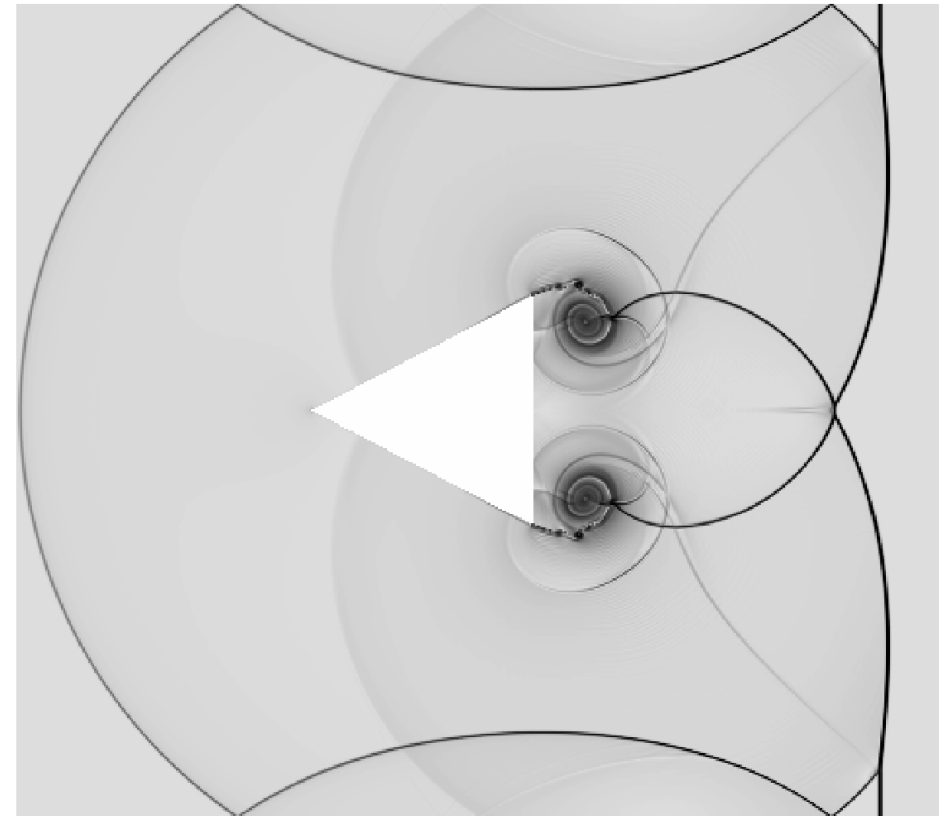
- ☐ Неявных схем интегрирования по времени
- ☐ Моделей турбулентности
- ☐ Солвера для несжимаемых течений
- ☐ Возможности использовать гибридные сетки

Дифракция ударной волны на треугольном теле

Экспериментальная теньевая фотография

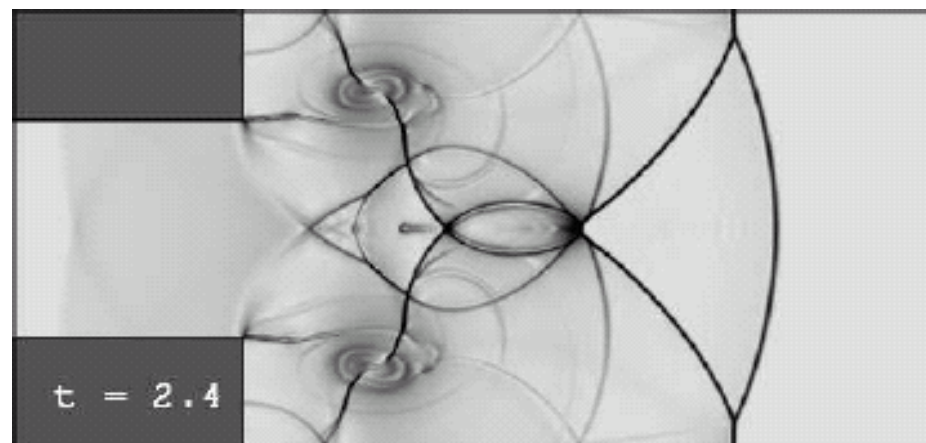
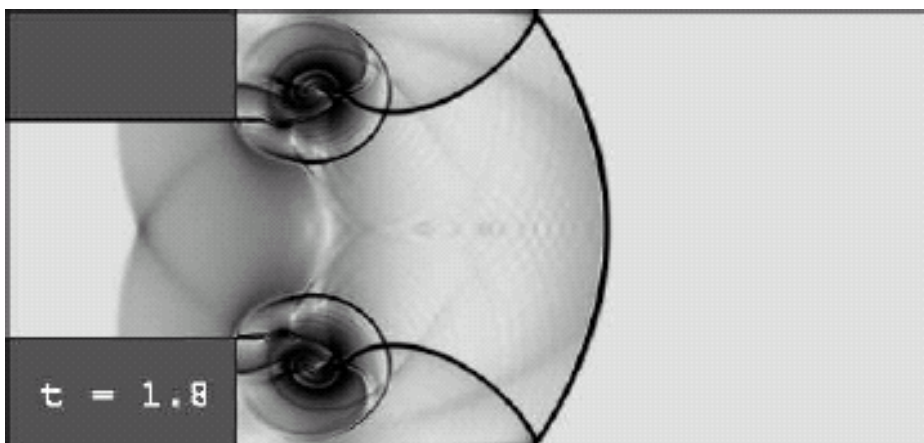
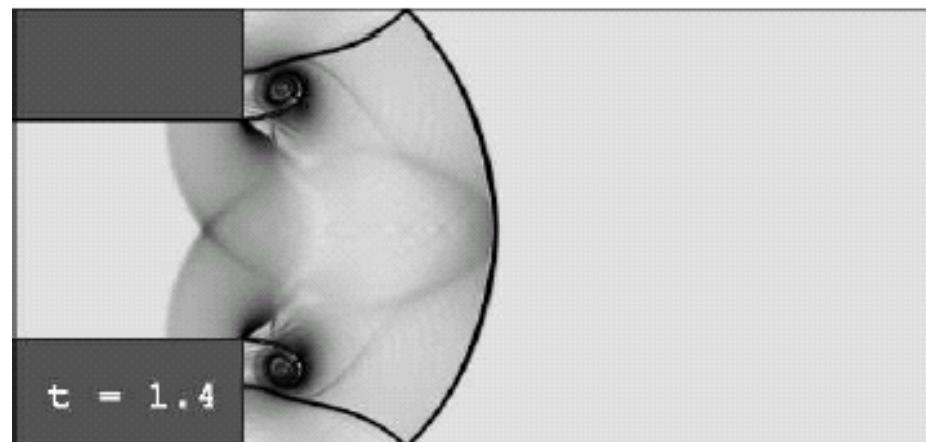
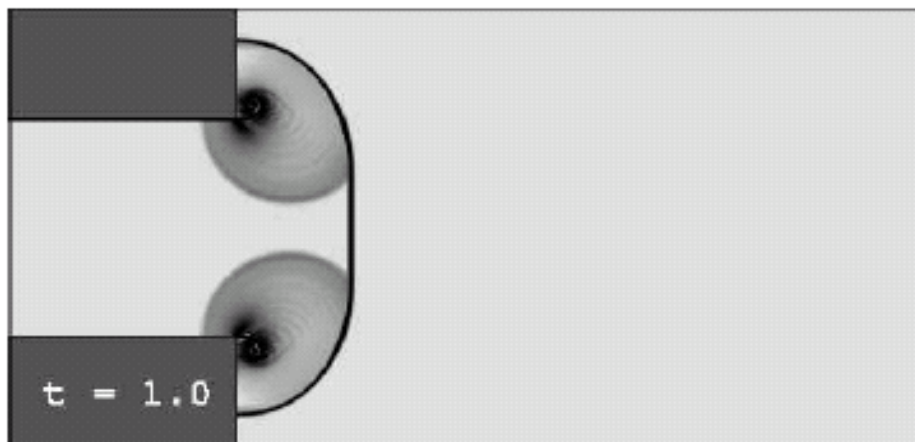


Численная шпирен-визуализация



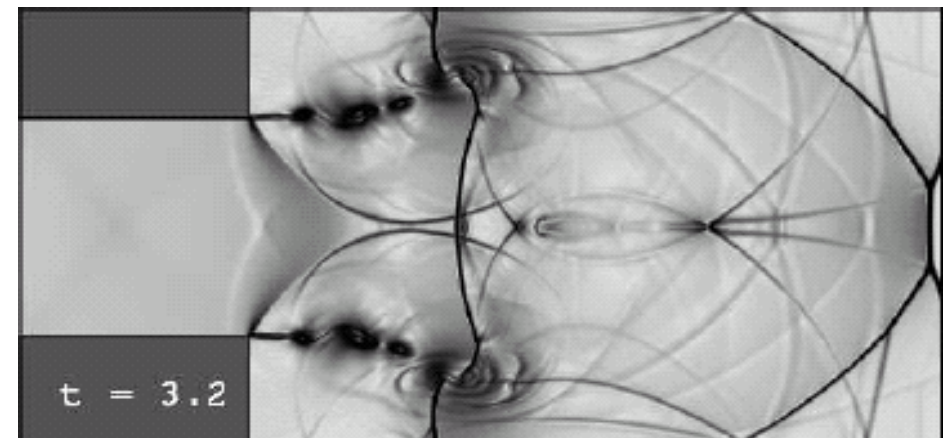
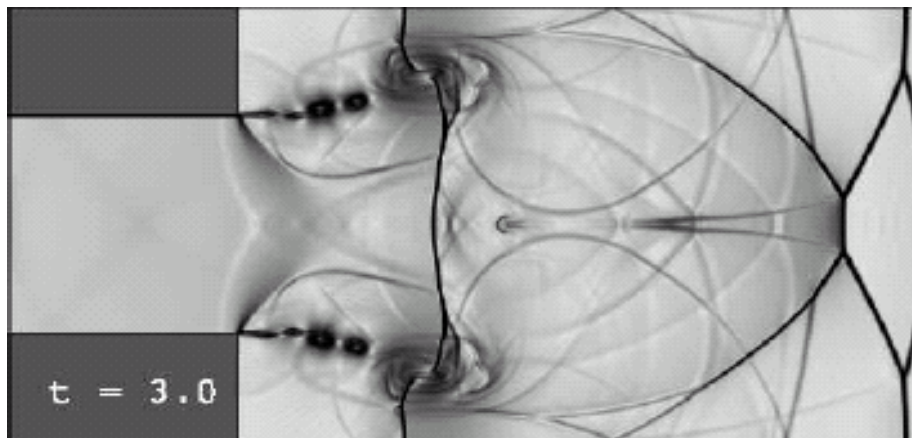
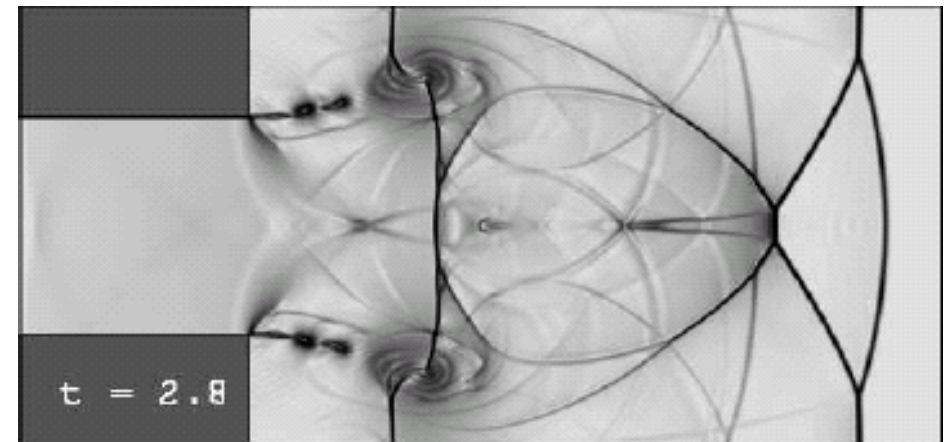
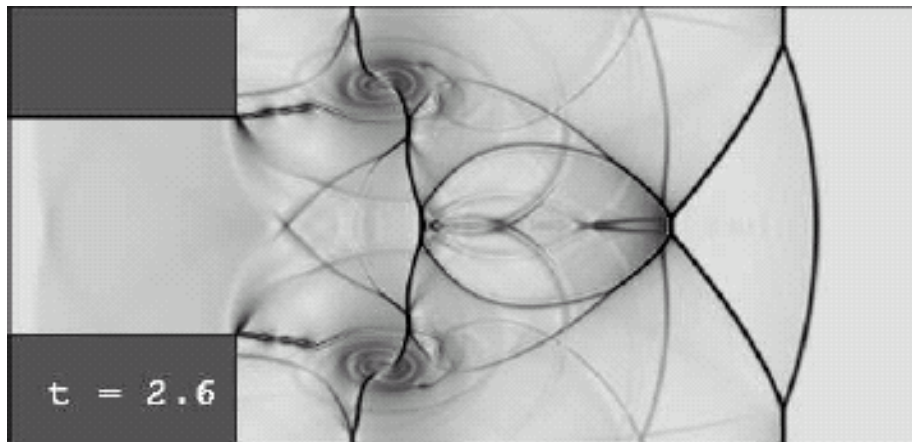
$$M_s = 1.3$$

Ударная волна в круглой трубе



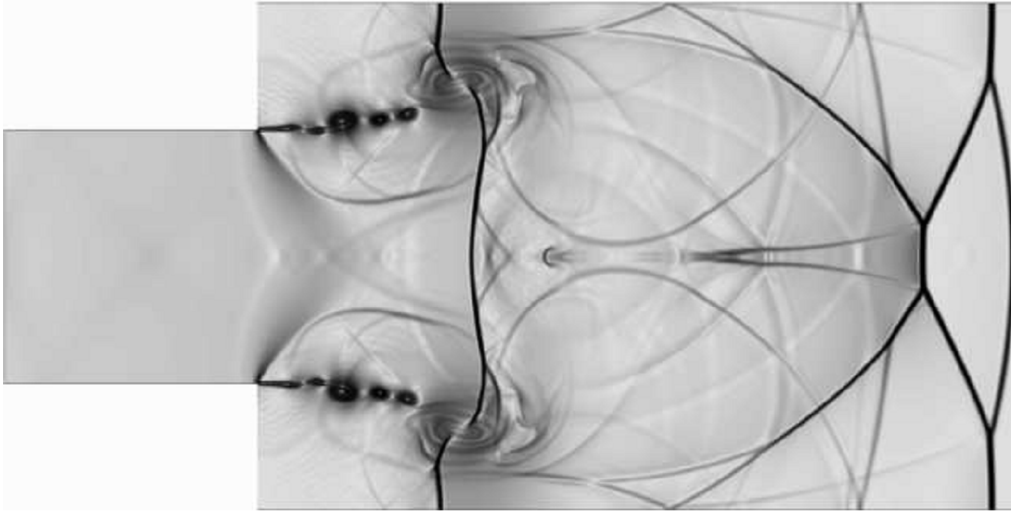
$$M_s = 1.5$$

Ударная волна в круглой трубе

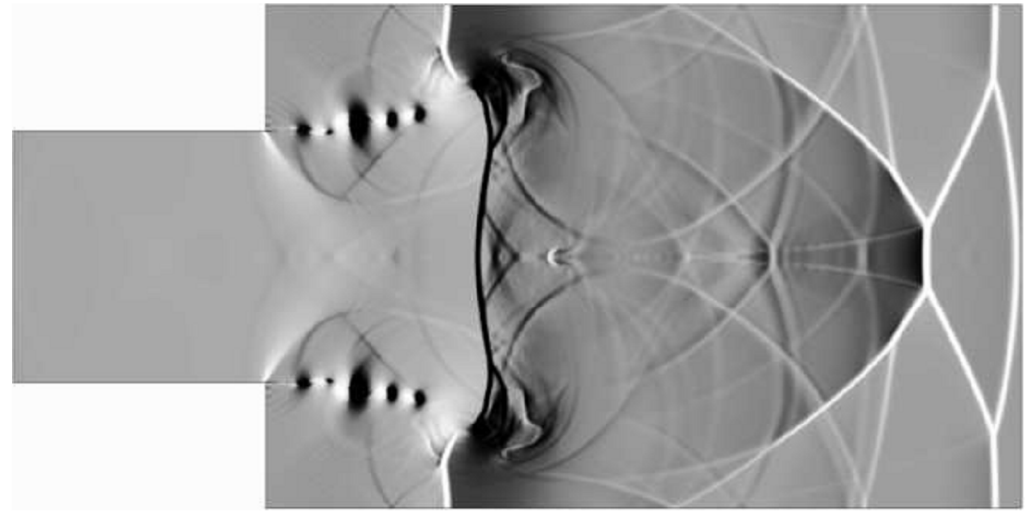


$$M_s = 1.5$$

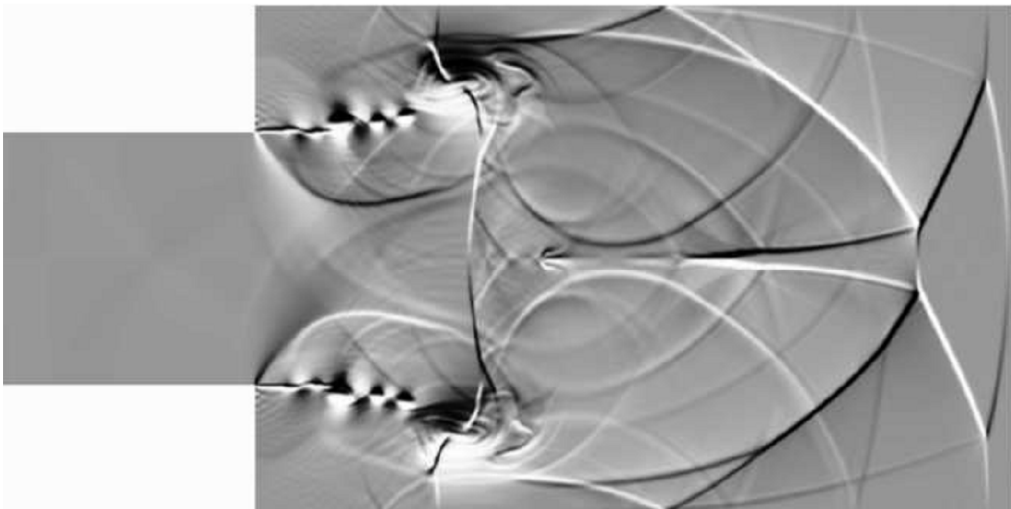
Различные техники визуализации



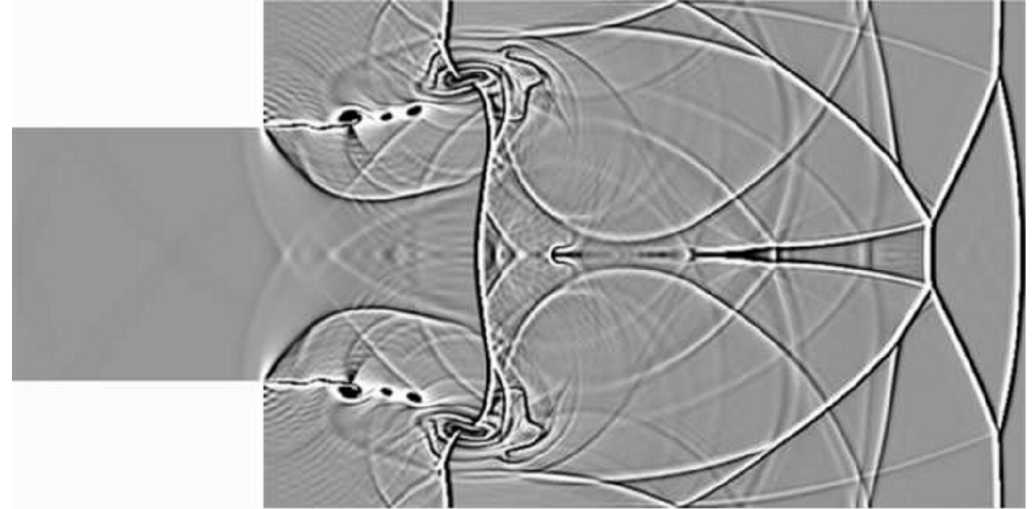
Schlieren displaying $|\nabla \rho|$



Schlieren displaying $\partial \rho / \partial x$



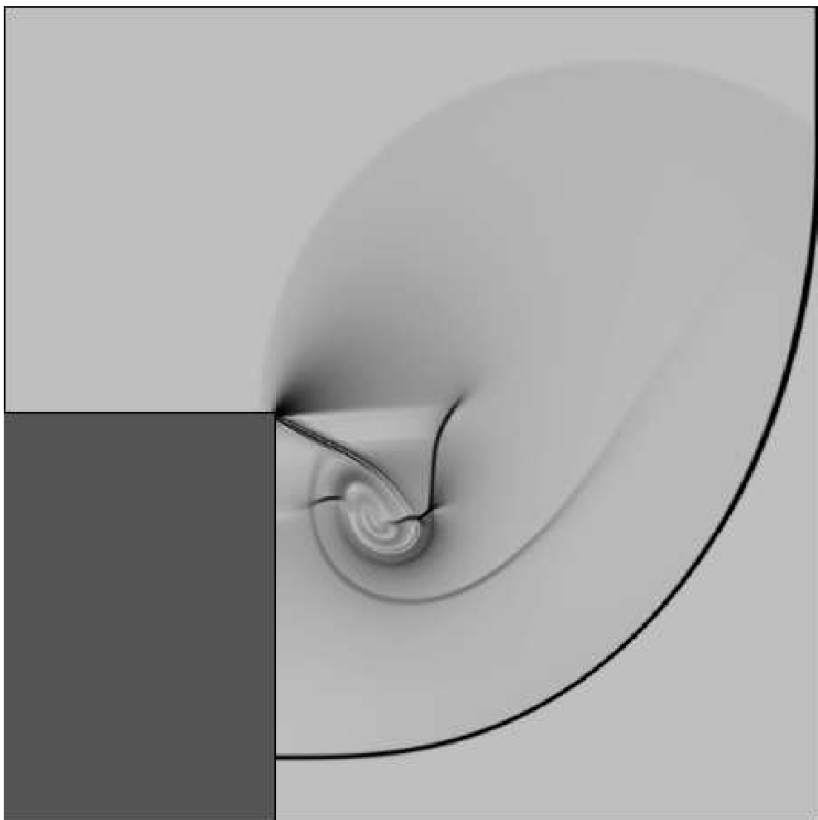
Schlieren displaying $\partial \rho / \partial y$



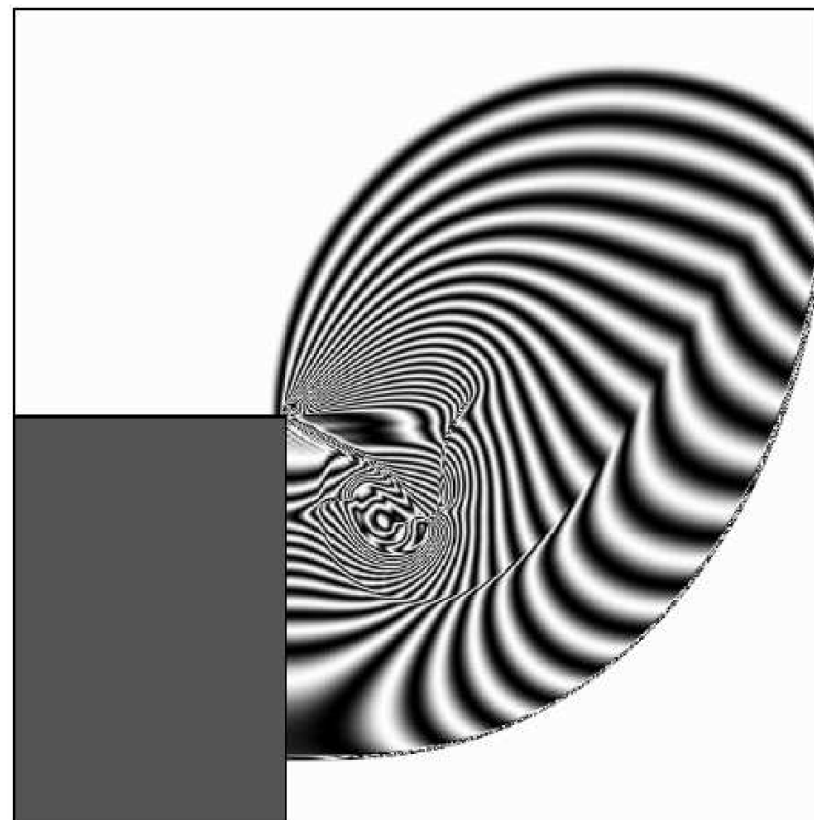
Shadowgraph

Различные техники визуализации

Numerical schlieren visualization

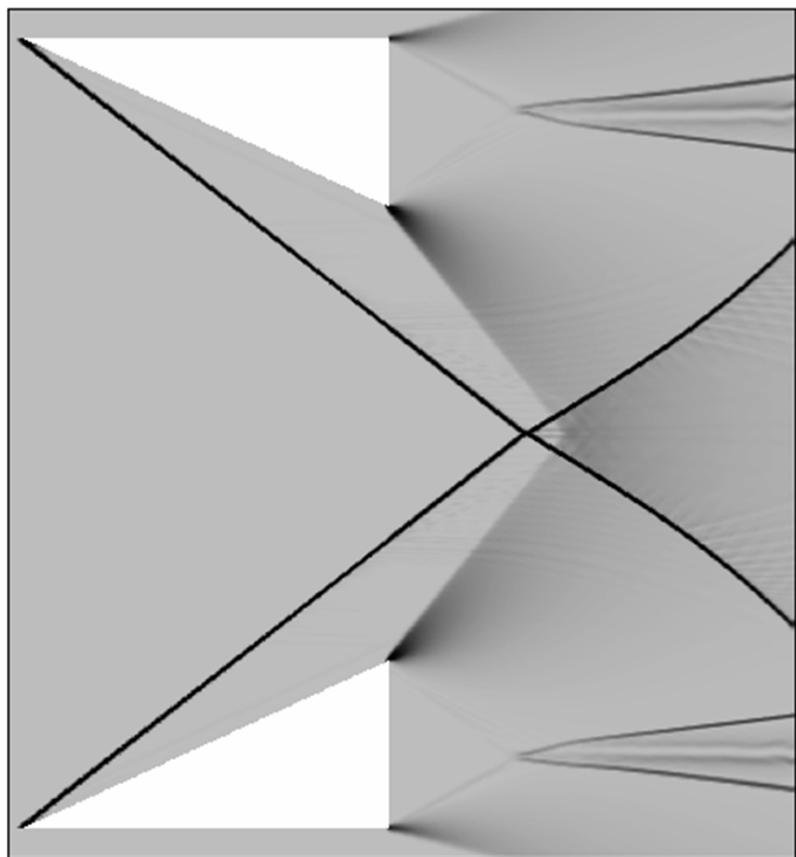


Numerical interferogram

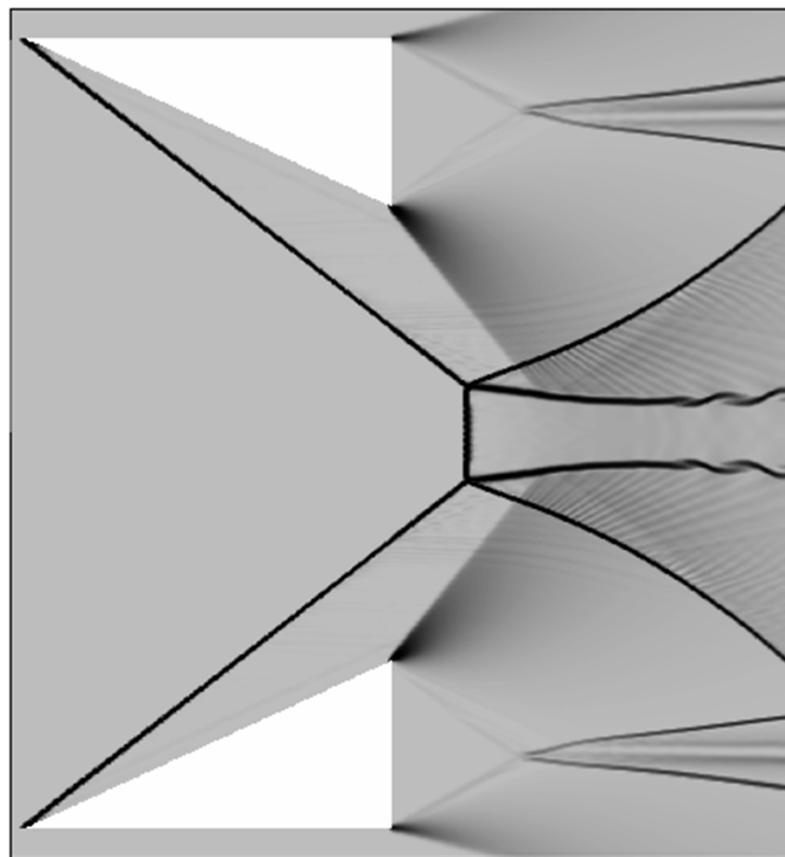


Дифракция ударной волны ($M = 2$) на прямом угле

Гистерезис при смене типов отражения



Регулярное отражение



Маховское отражение

$$M = 4$$

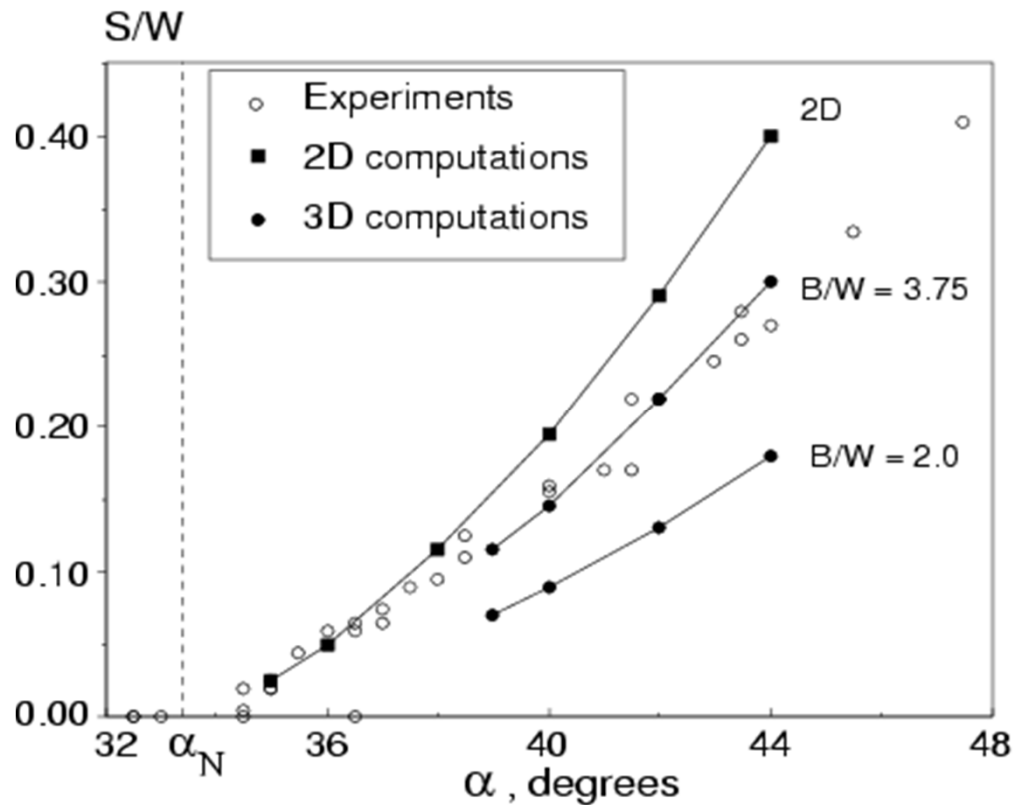
$$\alpha = 38^\circ$$

$$\alpha_N = 33.4^\circ,$$

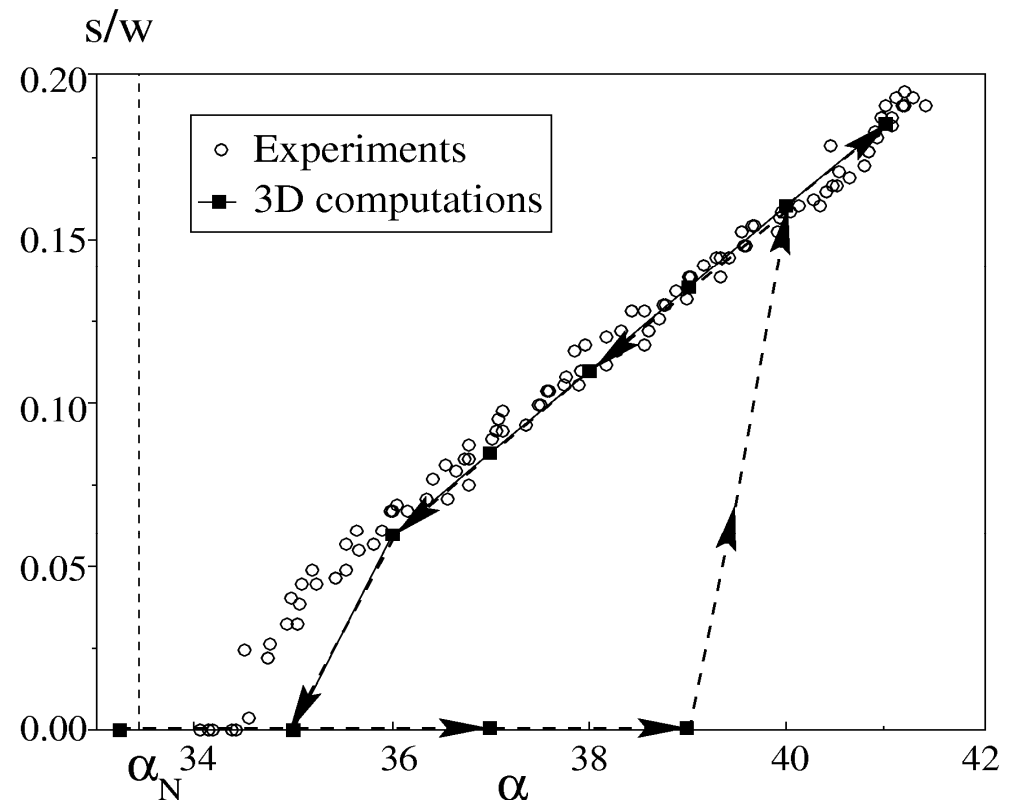
$$\alpha_D = 39.2^\circ$$

Численные шпирен-визуализации (поле градиента плотности)

Сравнение численных и экспериментальных результатов



$M = 4, b/w = 3.75, g/w = 0.56$



$M = 4, b/w = 2, g/w = 0.3$

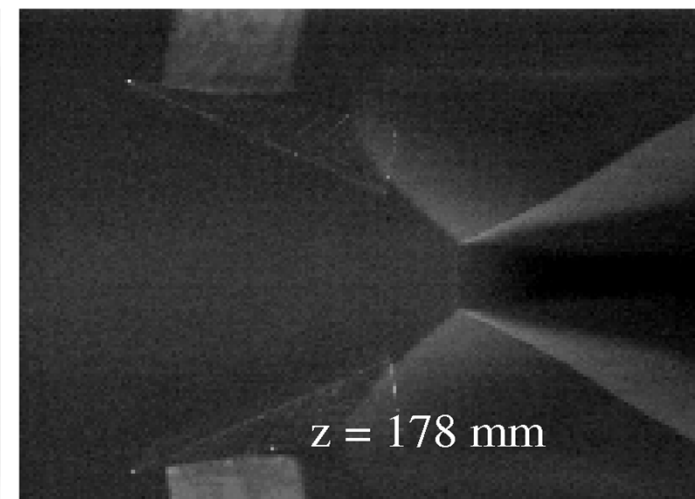
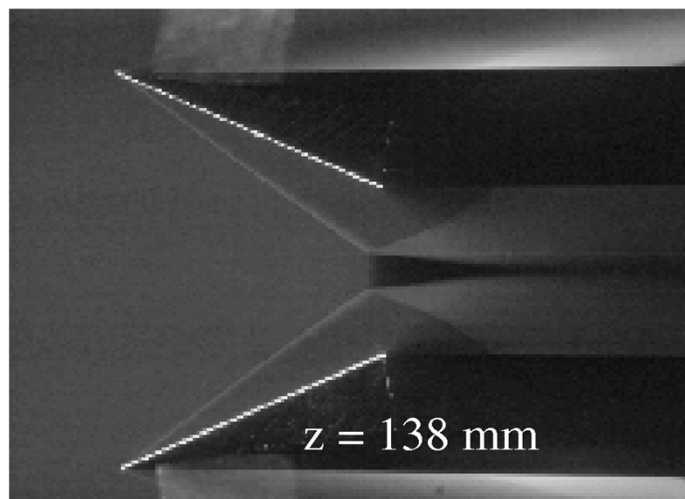
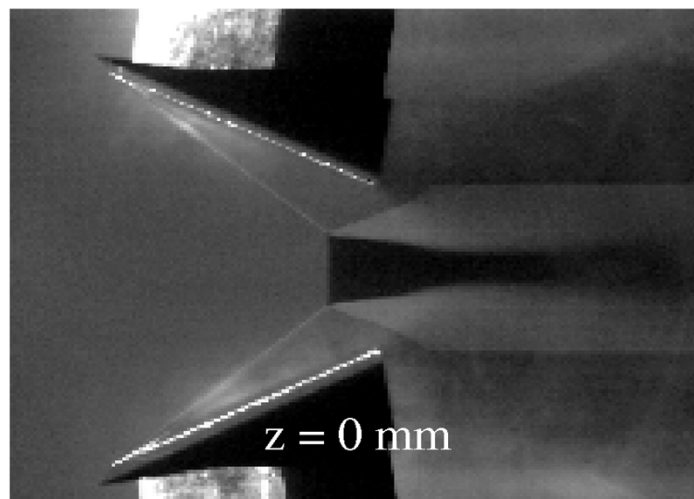
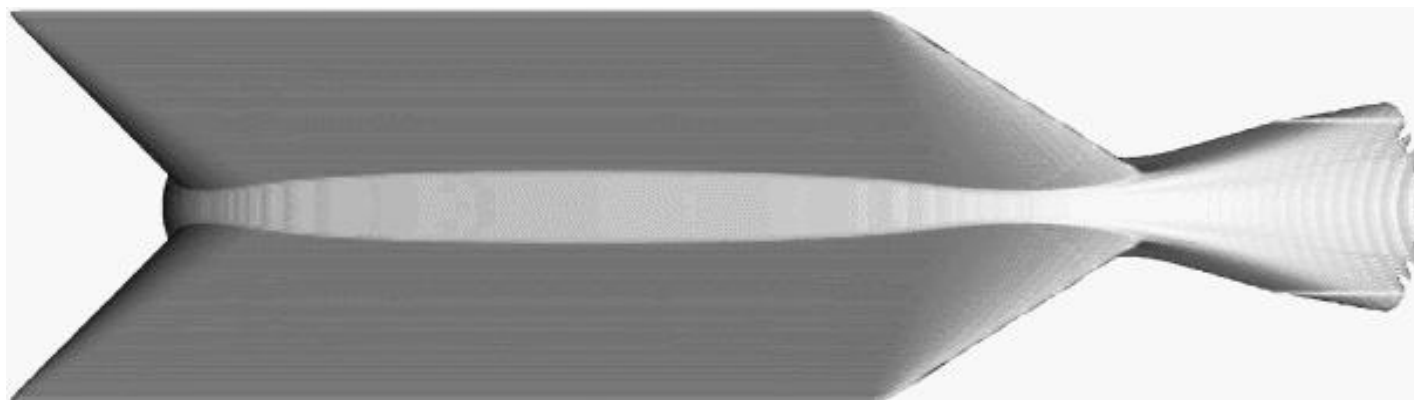
Трехмерная маховская конфигурация

$$M = 4$$

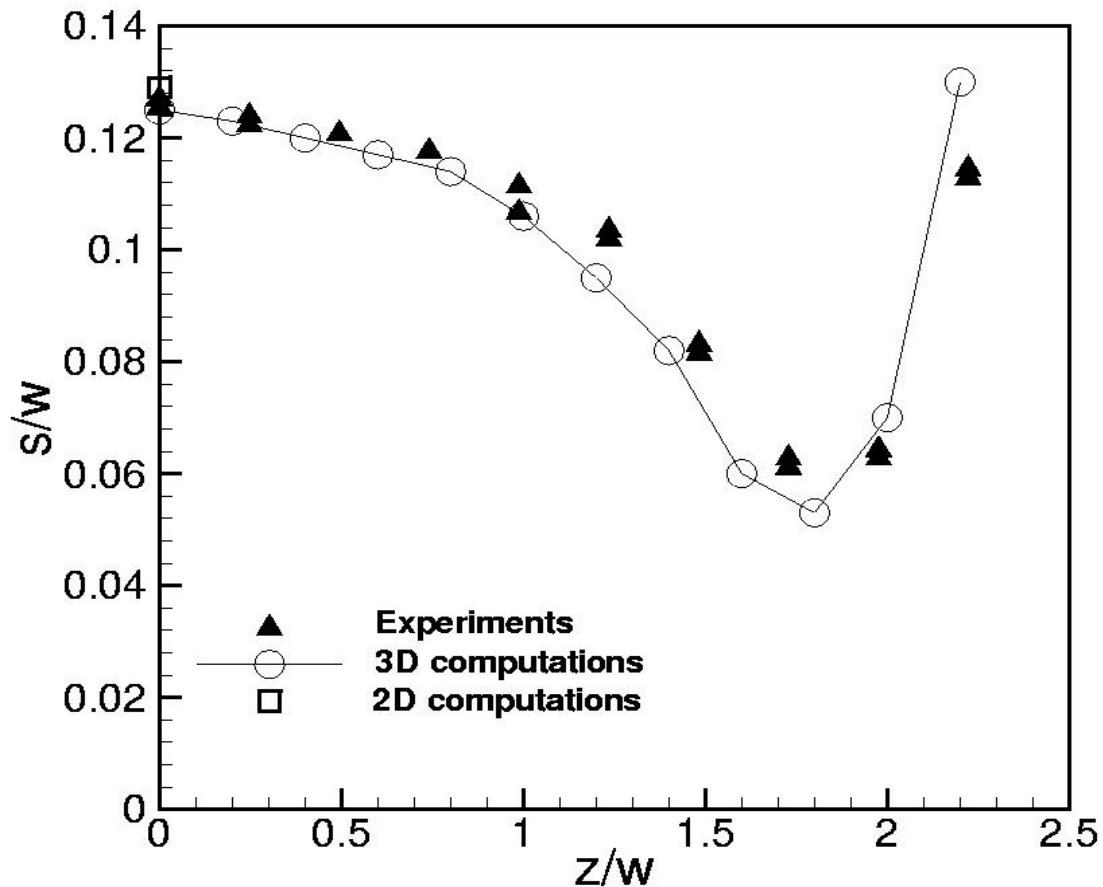
$$b/w = 3.75$$

$$g/w = 0.3$$

$$\alpha = 37^\circ$$



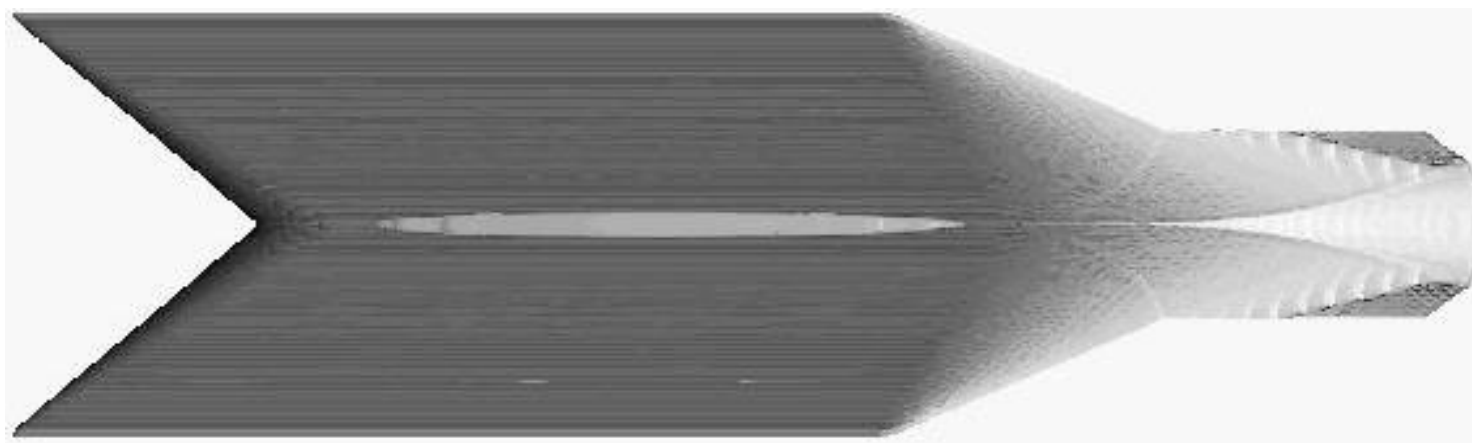
Изменение высоты ножки Маха по размаху



- Высота ножки Маха в различных продольных сечениях была измерена с помощью лазерного ножа и сравнена с результатами численного моделирования

$$M = 4, b/w = 3.75, g/w = 0.3, \alpha = 37^\circ$$

Комбинированное отражение

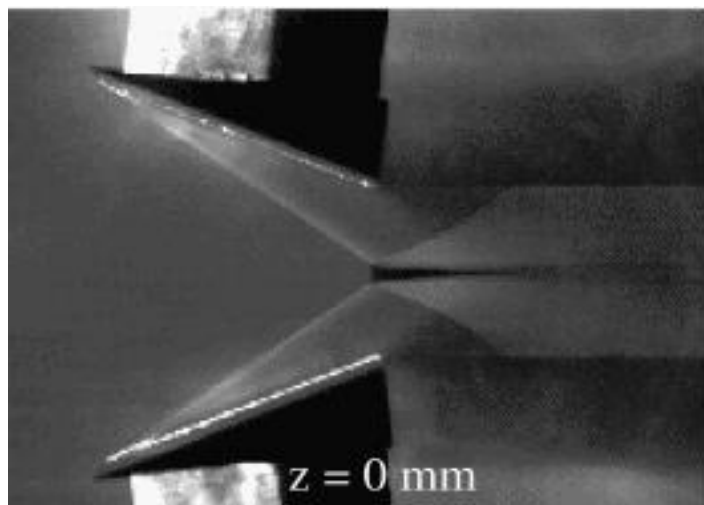


$$M = 4$$

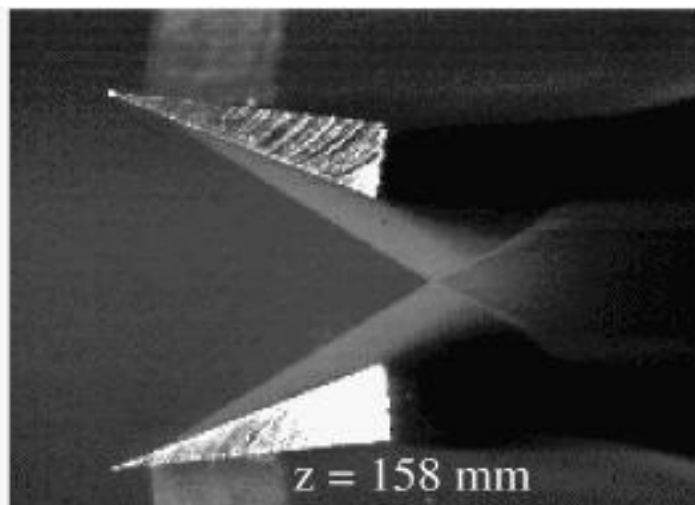
$$b/w = 3.75$$

$$g/w = 0.3$$

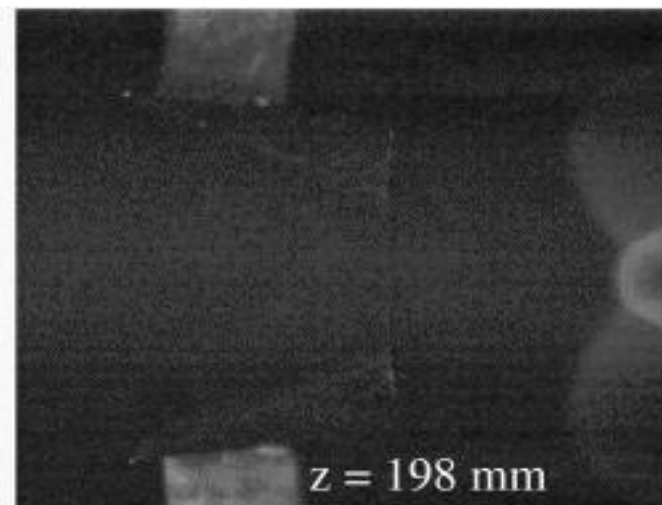
$$\alpha = 35.5^\circ$$



$z = 0$ mm



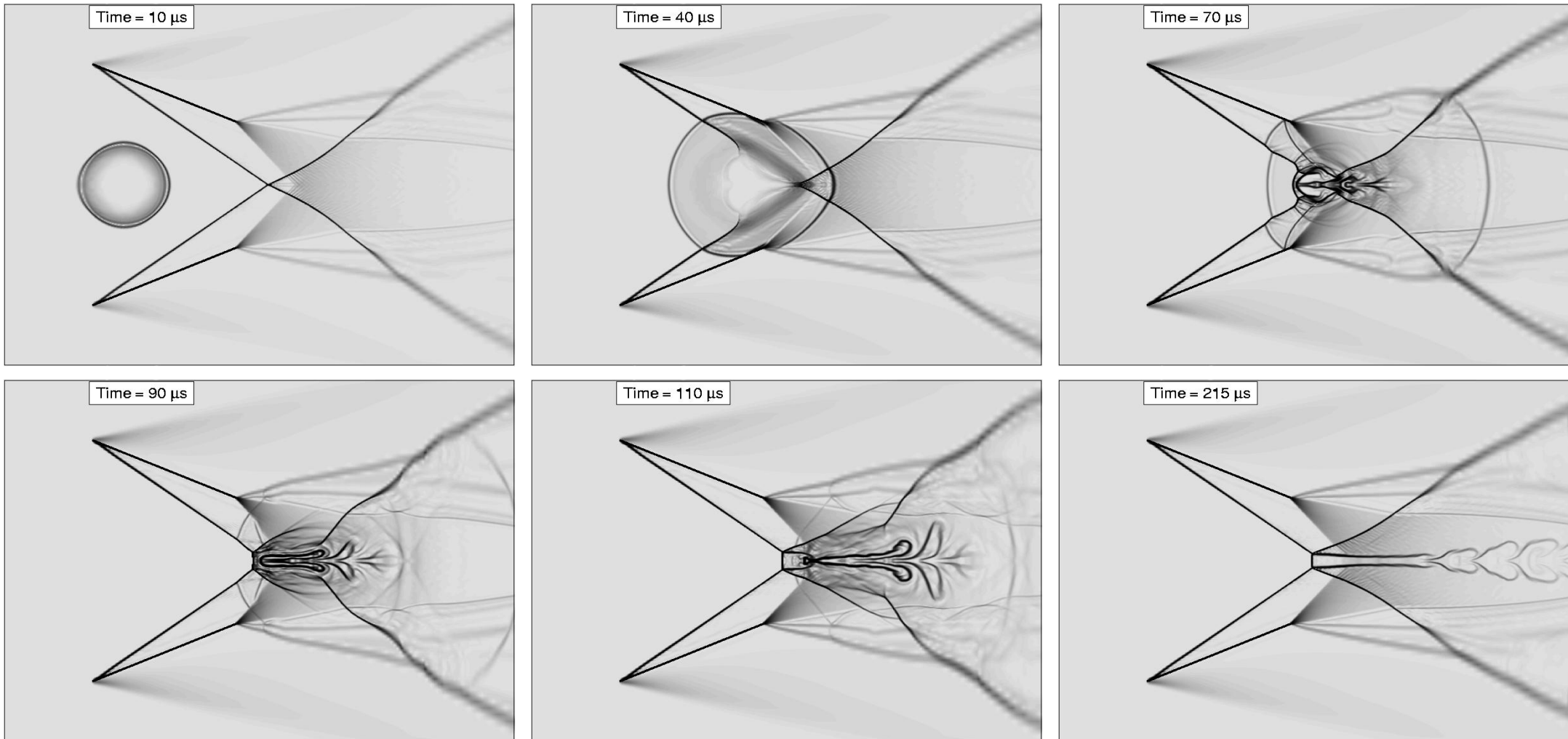
$z = 158$ mm



$z = 198$ mm

Воздействие лазерного импульса на регулярное отражение

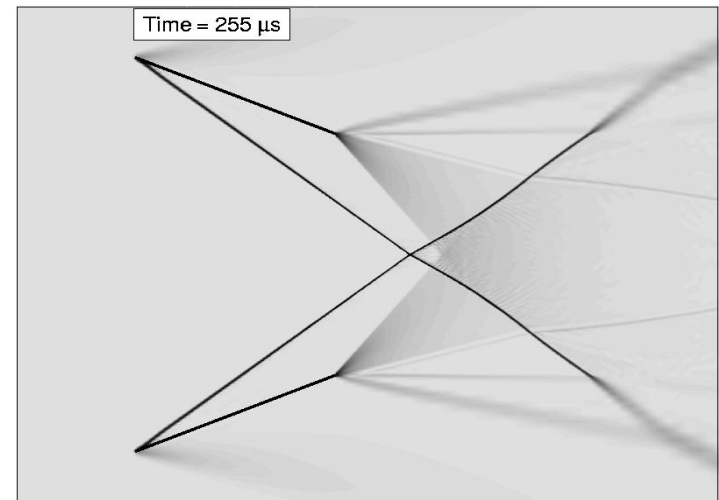
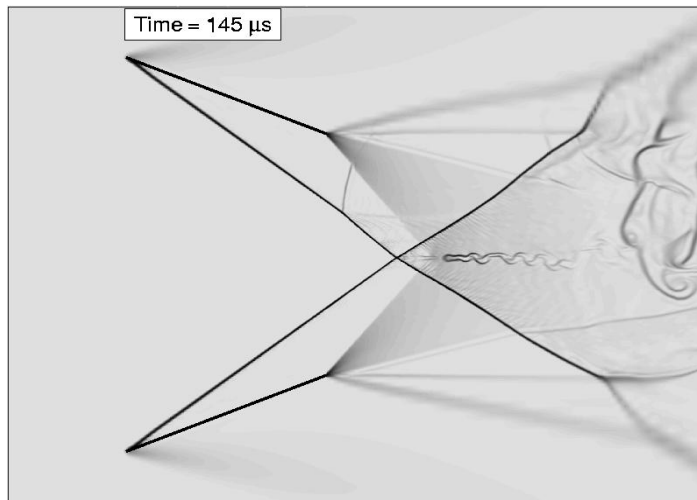
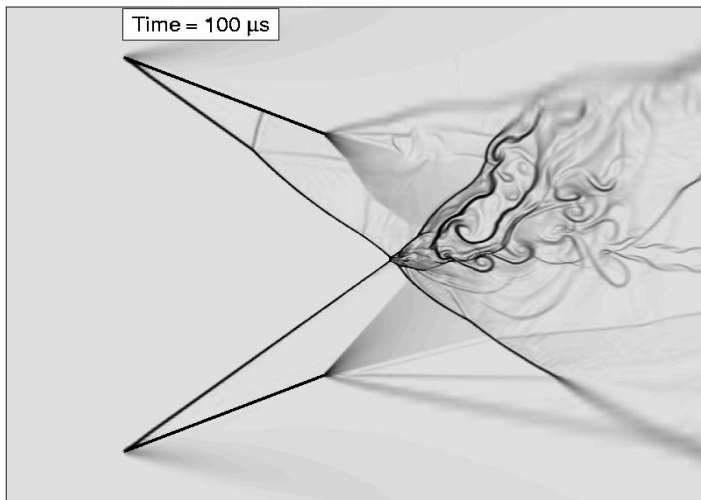
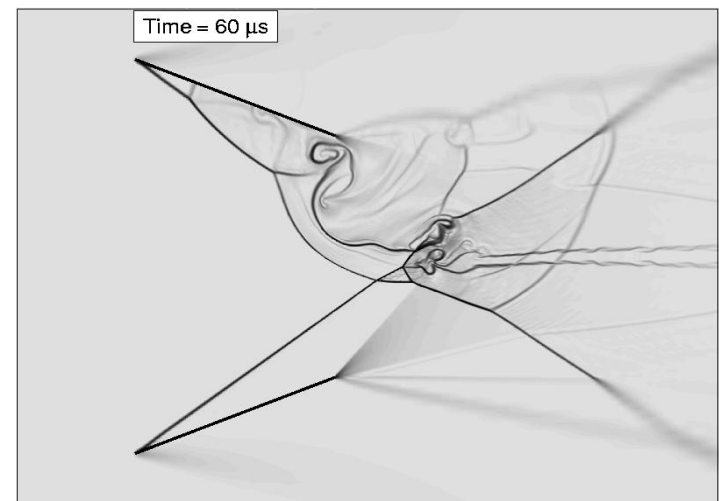
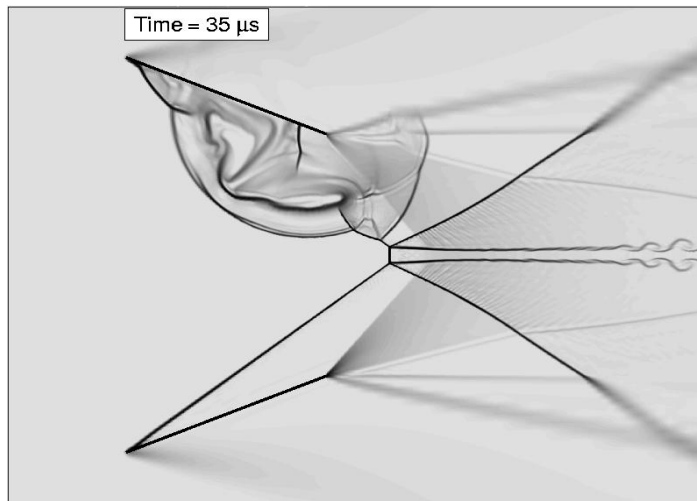
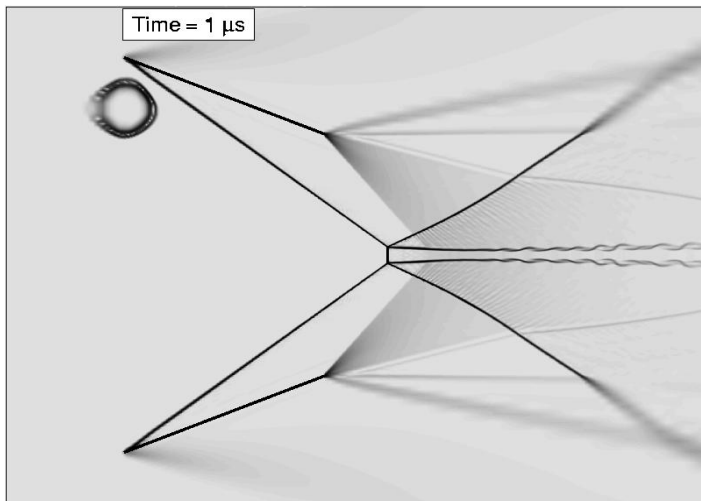
$M = 4$, $\alpha = 36^\circ$, $g/w = 0.43$, $b/w = 3.37$. Энергия 0.1 Дж



Воздействие лазерного импульса на маховское отражение

“Грубая сетка”: 35 млн. ячеек, $\Delta y_{\min}/w = 2 \times 10^{-3}$

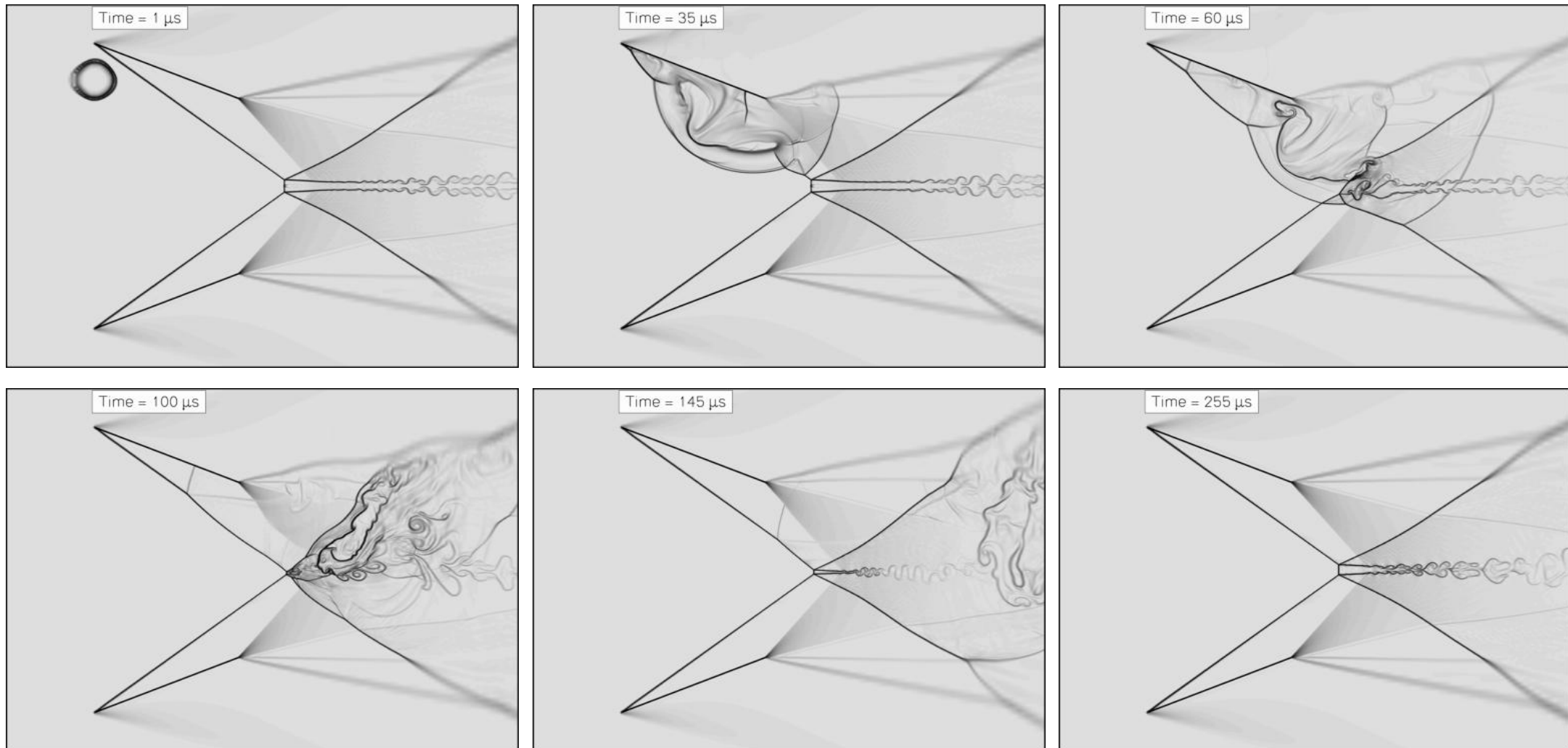
$M = 3.45$, $\alpha = 37.2^\circ$, $g/w = 0.595$, $b/w = 2.198$. Энергия 0.215 Дж



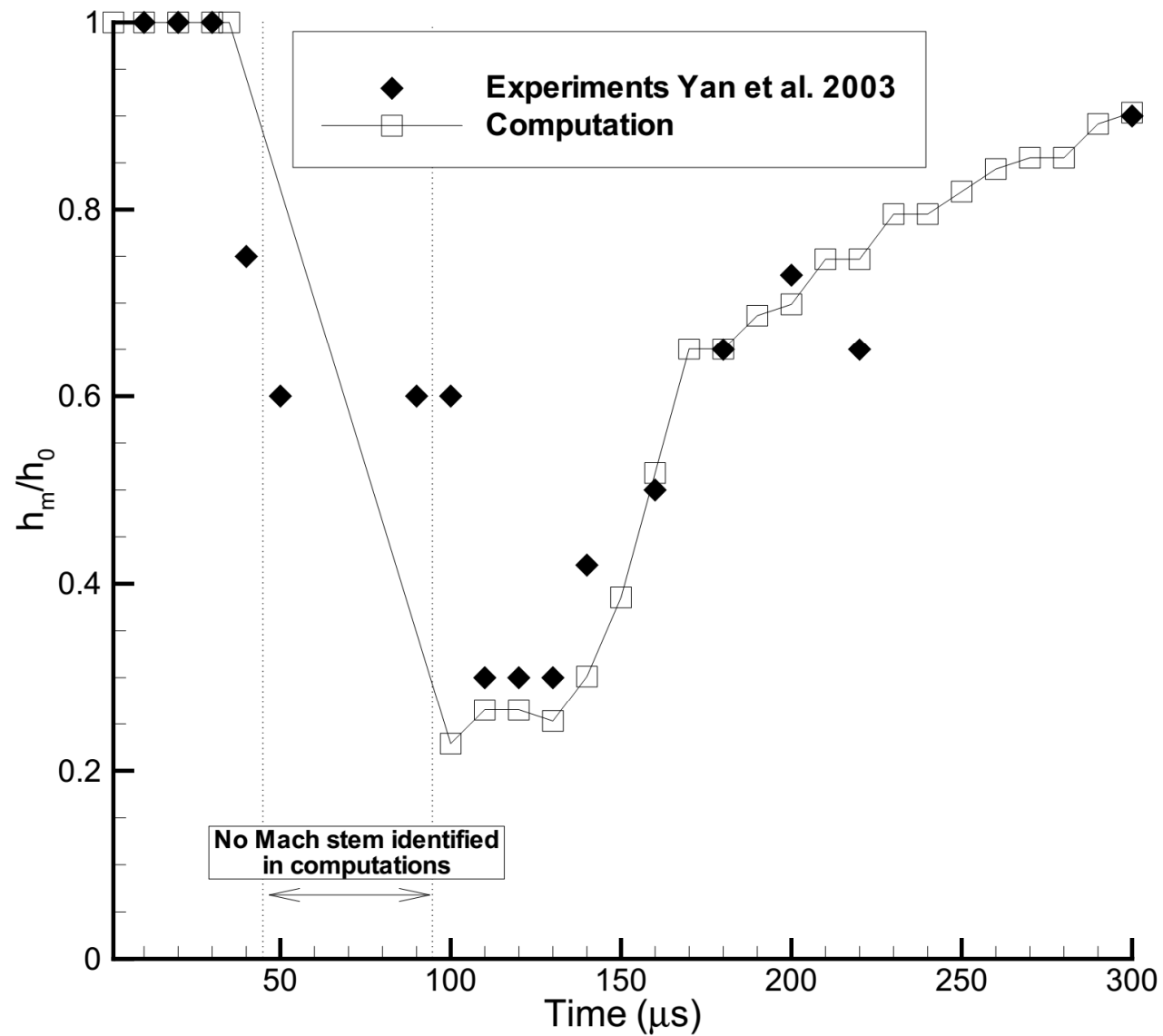
Воздействие лазерного импульса на маховское отражение

“Мелкая сетка”: 120 млн. ячеек, $\Delta y_{\min}/w = 1.3 \times 10^{-3}$

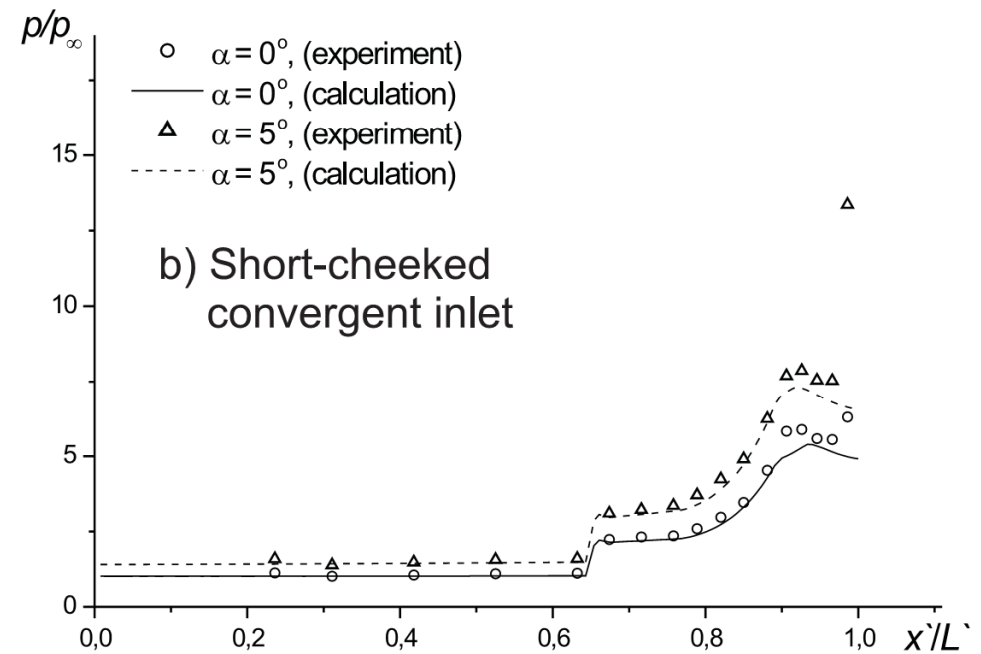
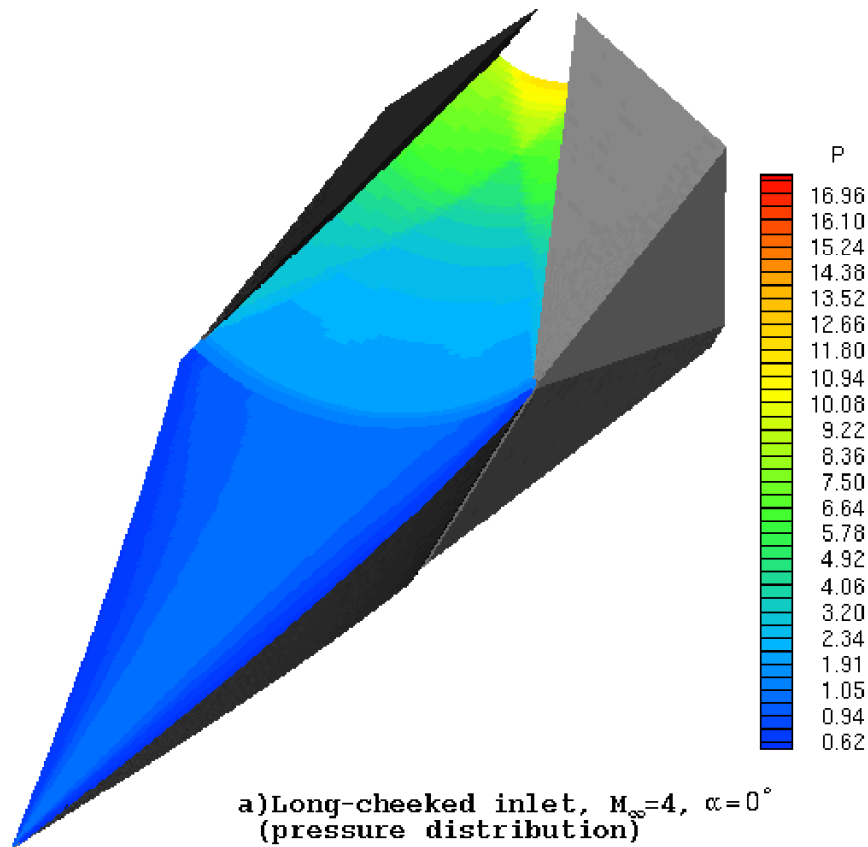
$M = 3.45$, $\alpha = 37.2^\circ$, $g/w = 0.595$, $b/w = 2.198$. Энергия 0.215 Дж



Изменение высоты ножки Маха по времени

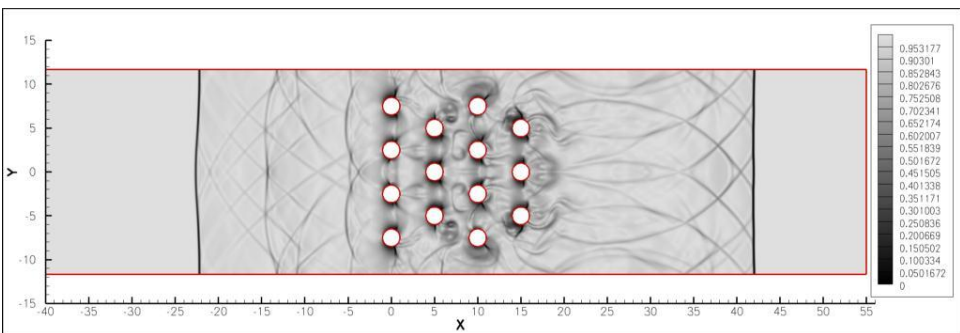
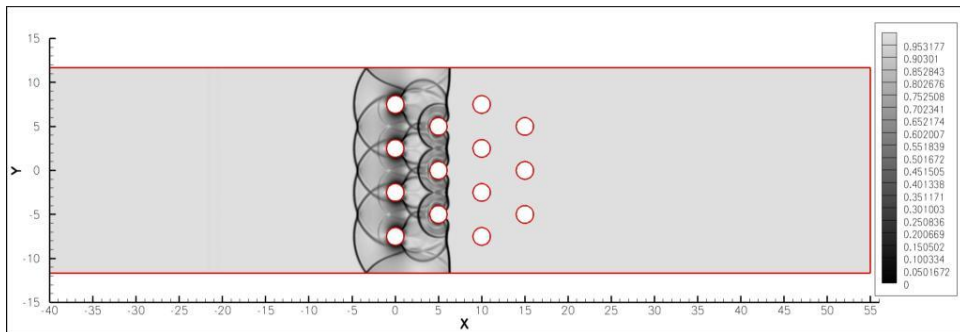
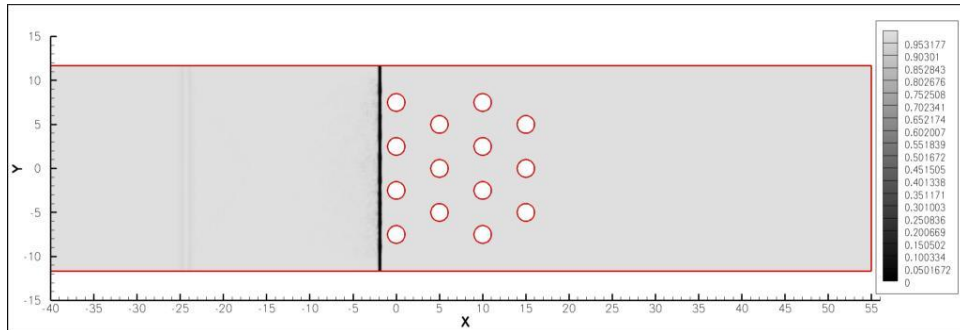


Маршевый код для чисто сверхзвуковых течений

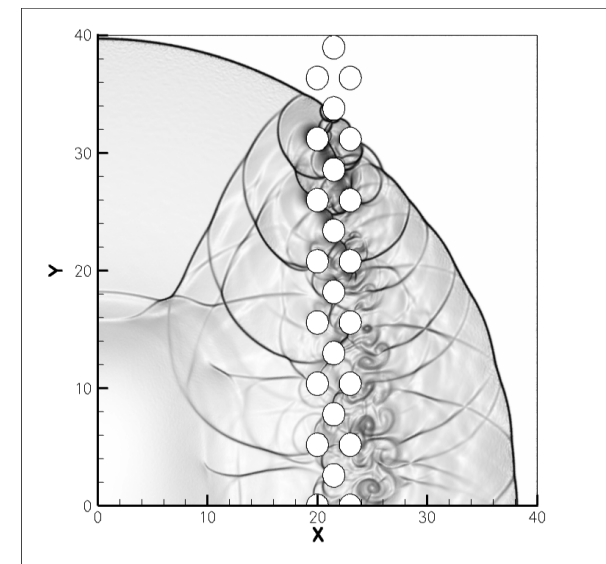
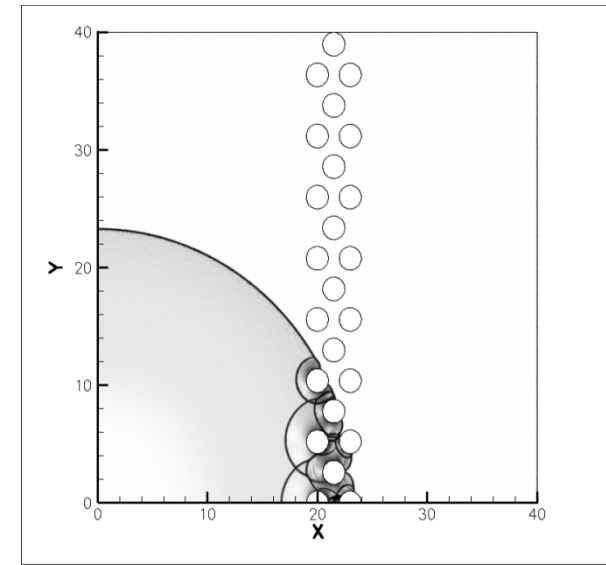


Распределение давления по поверхности конвергентной поверхности сжатия при $M_\infty = 4$, $\alpha = 0^\circ$ (слева) и изменение давления вдоль средней линии при том же числе Маха (справа).

Расчеты на неструктурированных сетках

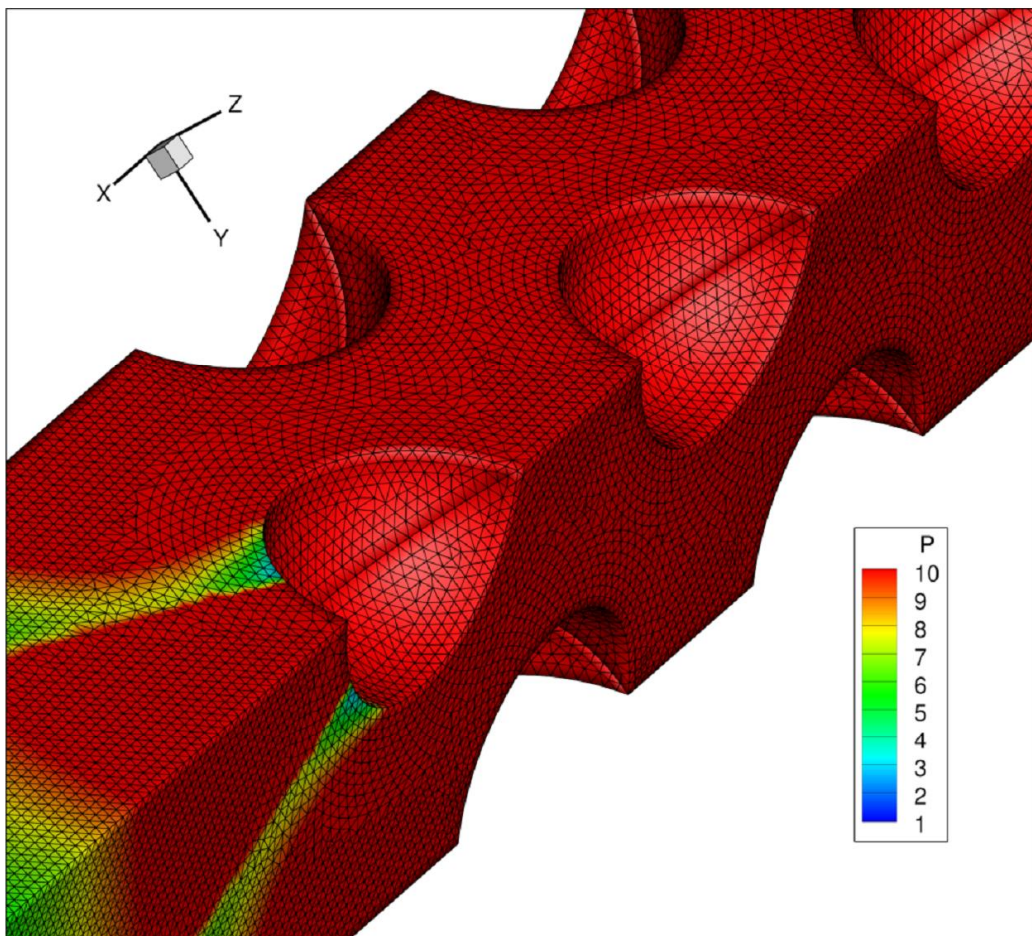


Ударная волна ($M=1.4$) взаимодействует с системой цилиндров в ударной трубе

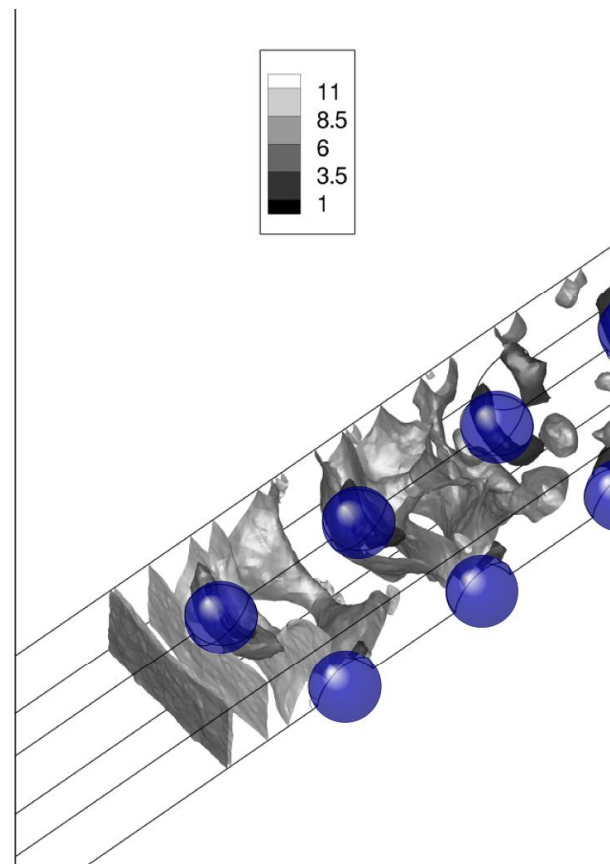


Взрывная волна проходит через пористый барьер

Прохождение УВ через систему сфер



Расчетная сетка



Форма ударной волны

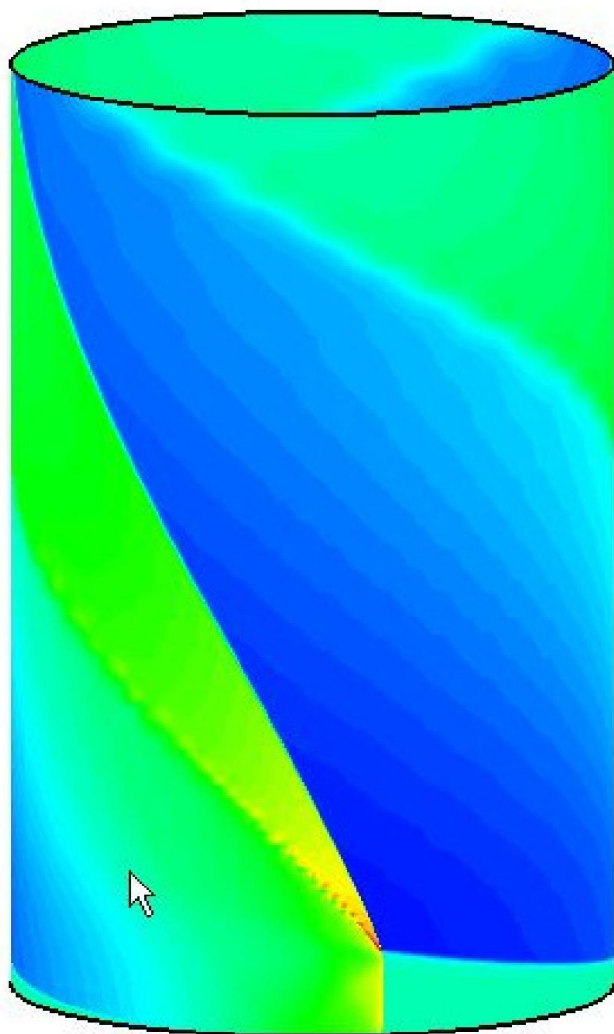
Моделирование химически реагирующих течений

- ☐ Уравнения Эйлера для многокомпонентной смеси химически реагирующих газов
- ☐ Полиномиальные аппроксимации термодинамических свойств индивидуальных веществ (база данных A. Burcat)
- ☐ Произвольный набор химических реакций, заданный в формате CHEMKIN
- ☐ Аддитивная полунеявная схема Рунге-Кутты для интегрирования по времени (неявным образом берутся химические источниковые члены)

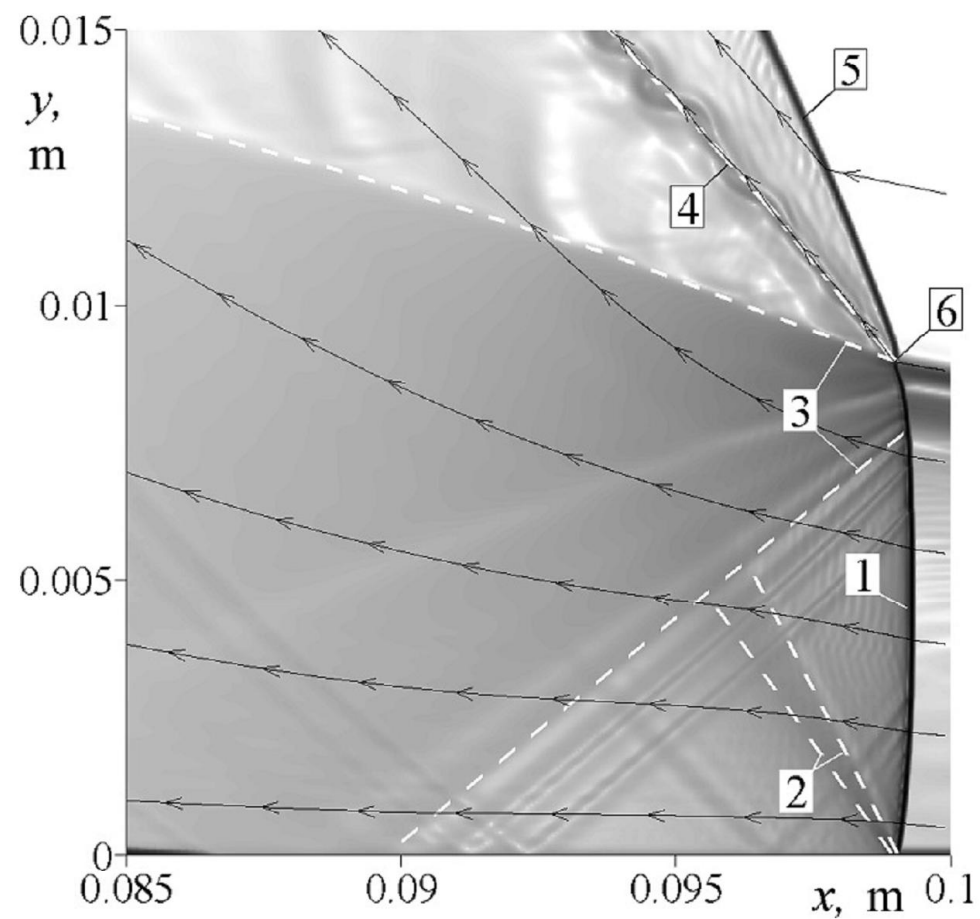
ДВ в кольцевом канале



$U, \text{ m/s}$ -1000 -500 0 500 1000 1500 2000

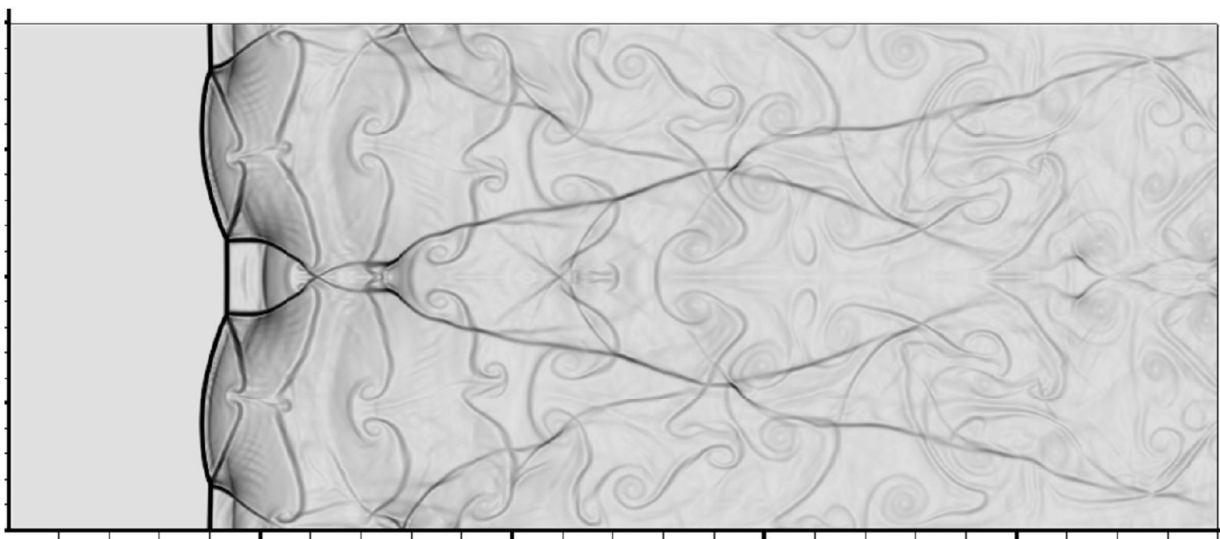


Поле скорости

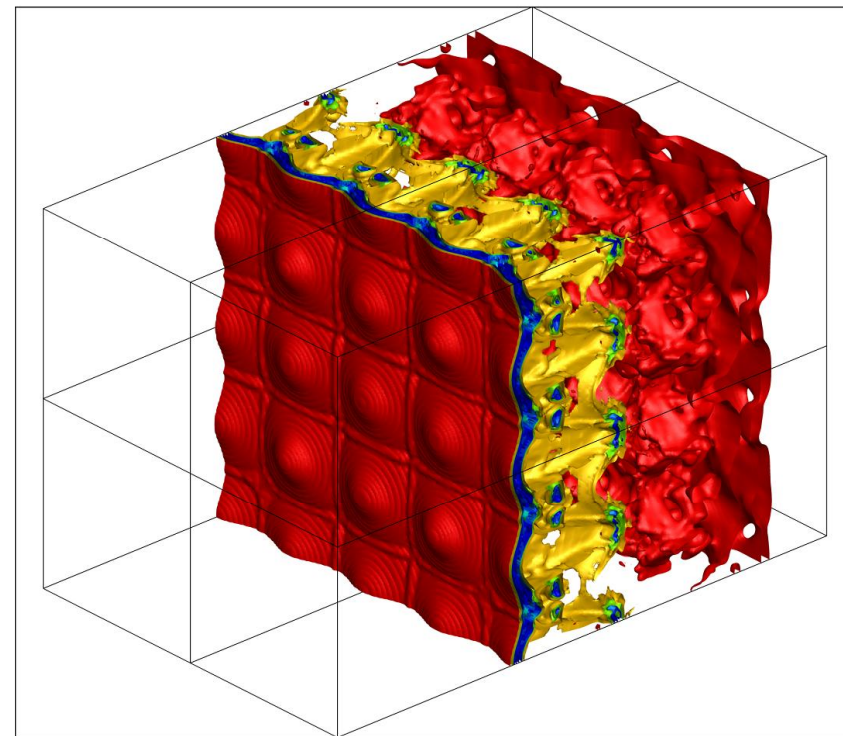


Шлирен-визуализация и линии
тока

Многофронтальная структура ДВ

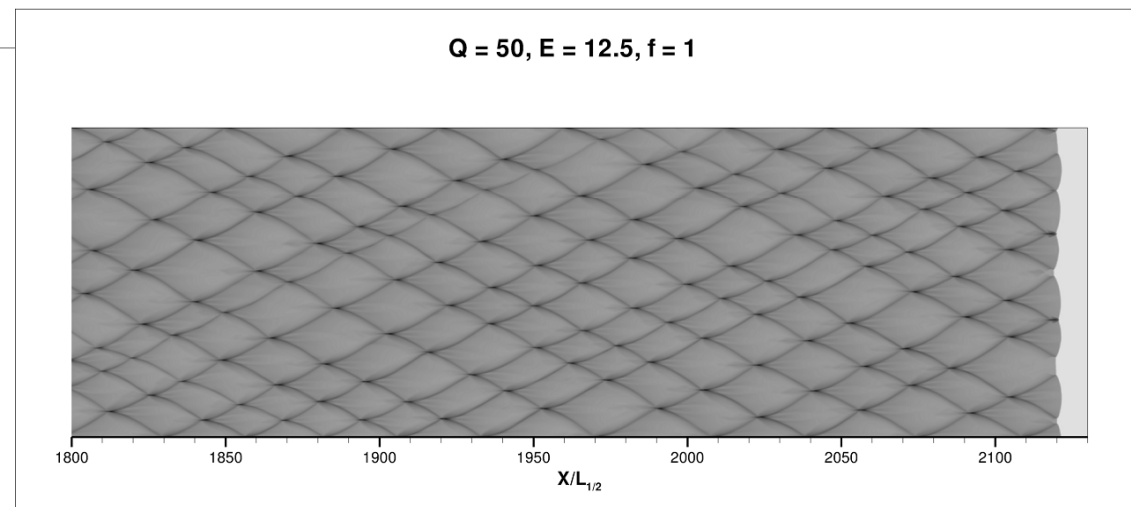
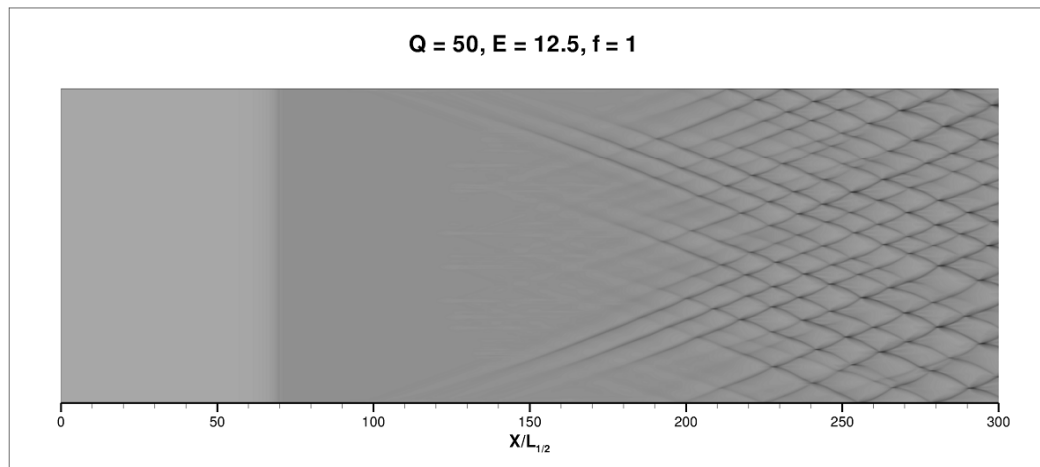
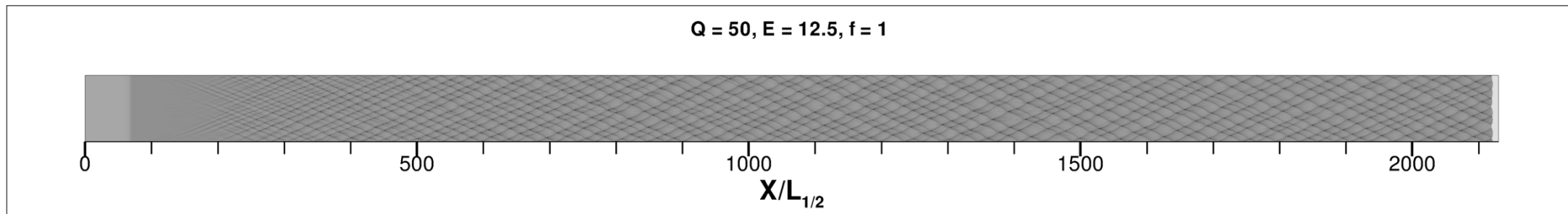


ДВ в плоском канале, смесь H_2/O_2 ,
химическая модель *ONERA* (6 компонент,
7 реакций)

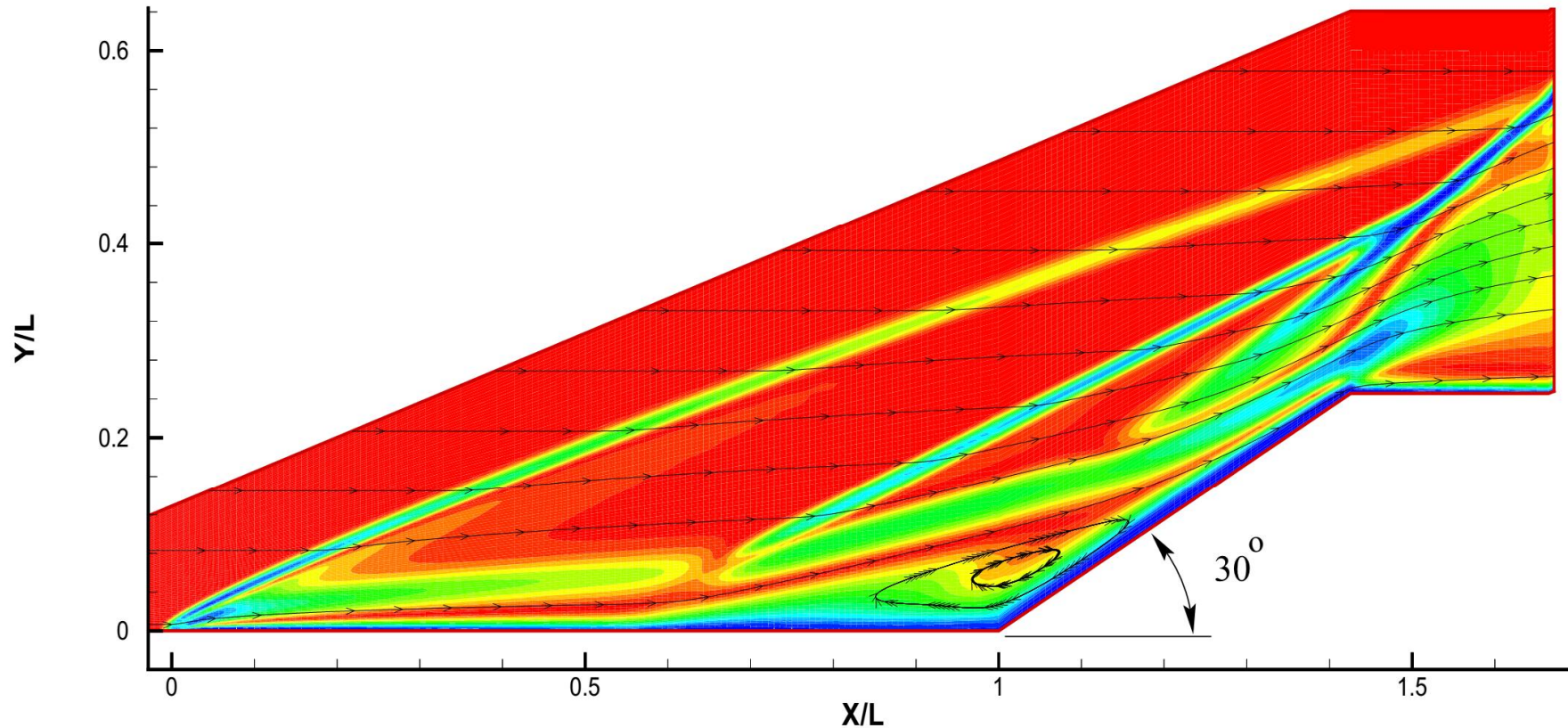


Трехмерная ДВ, модель с
одной реакцией

Формирование многофронтной структуры



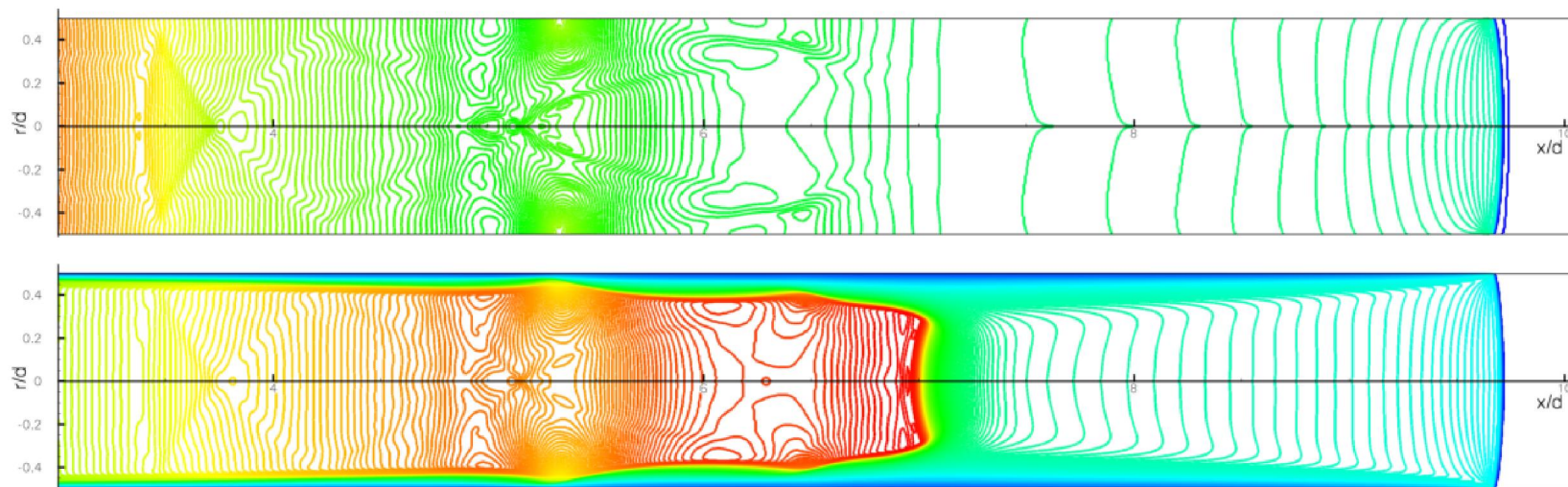
Ламинарное отрывное течение над полым цилиндром с юбкой



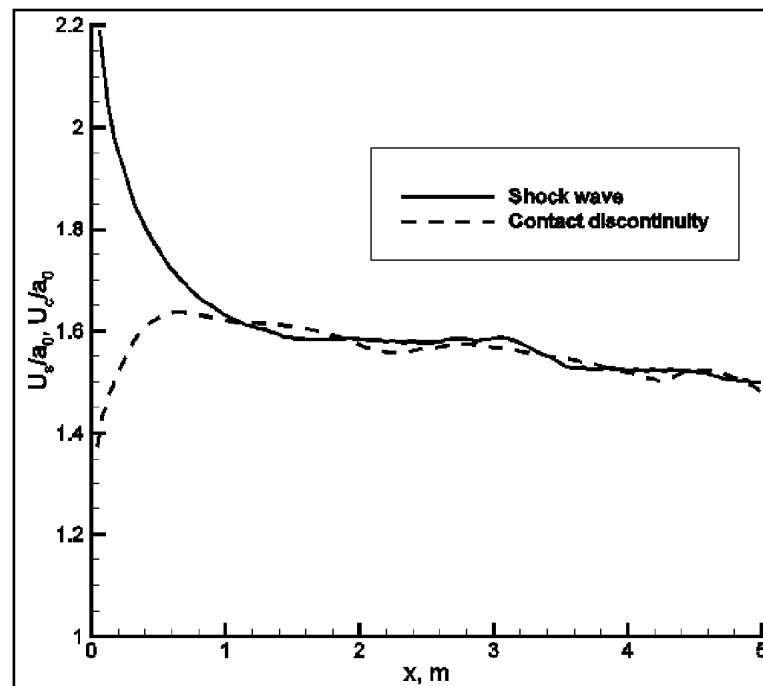
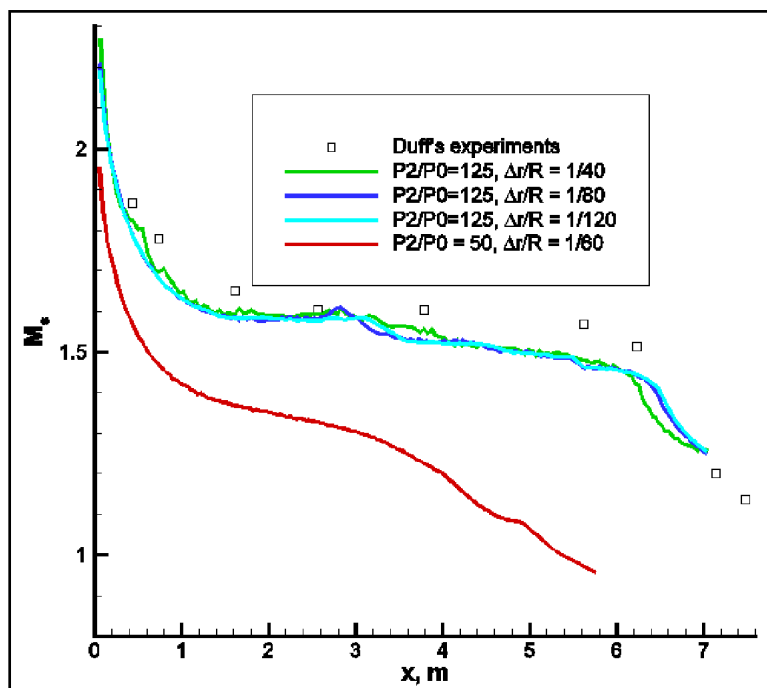
Цветной численный шлирен и линии тока

$$M_{\infty} = 9.91, Re_L = 18\,916, T_{\infty} = 51\text{ K}, T_w = 293\text{ K}, p_{\infty} = 6.3\text{ Pa}$$

Численное моделирование эксперимента Даффа

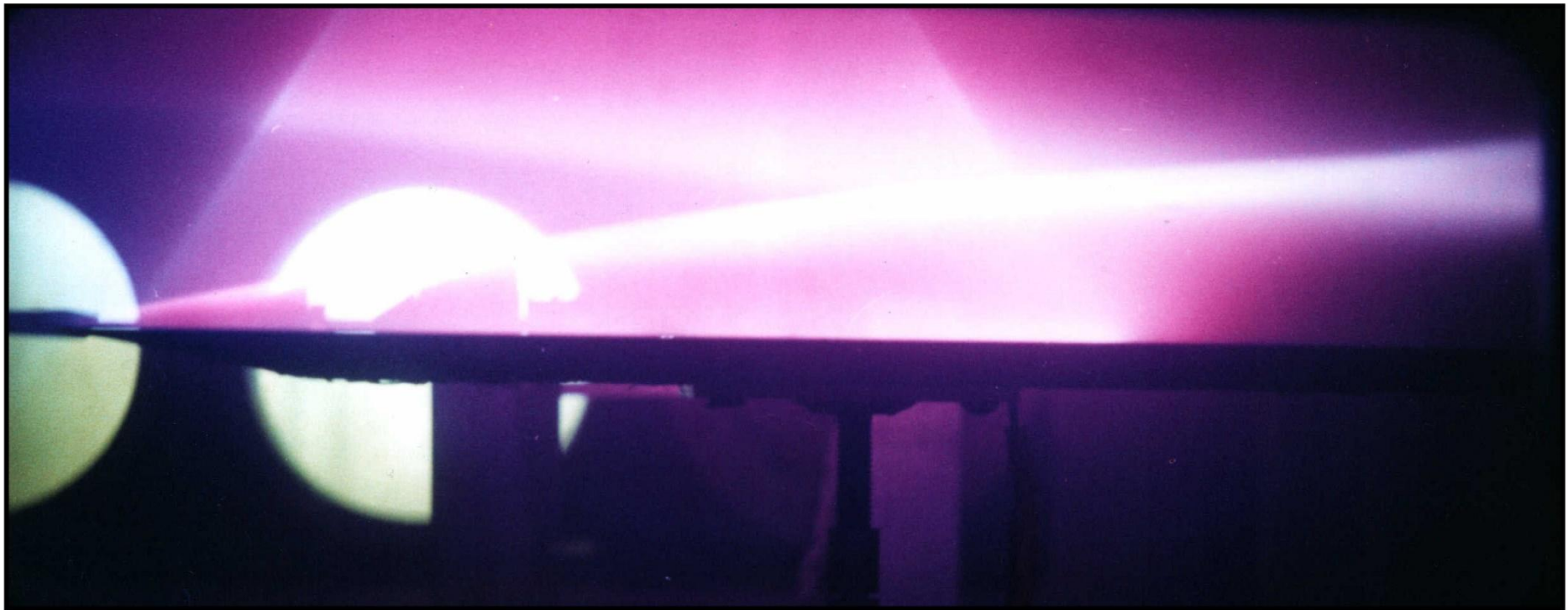


Поле давления (вверху) и поле чисел Маха (внизу). $H = 28.575$ мм, $L = 7,5$ м, $p_1 = 66.66$ Па, $p_4/p_1 = 100$.



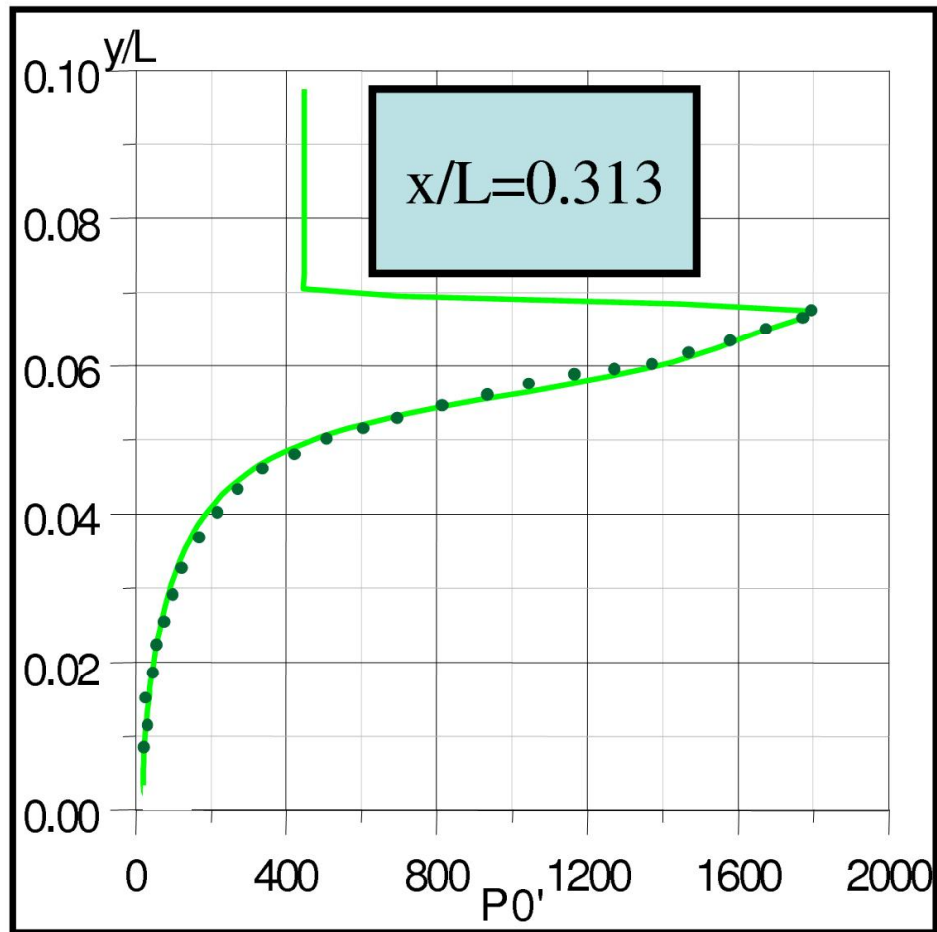
Изменение числа Маха УВ (слева), скорости УВ и контактного разрыва (справа)

Гиперзвуковой вязкий ударный слой

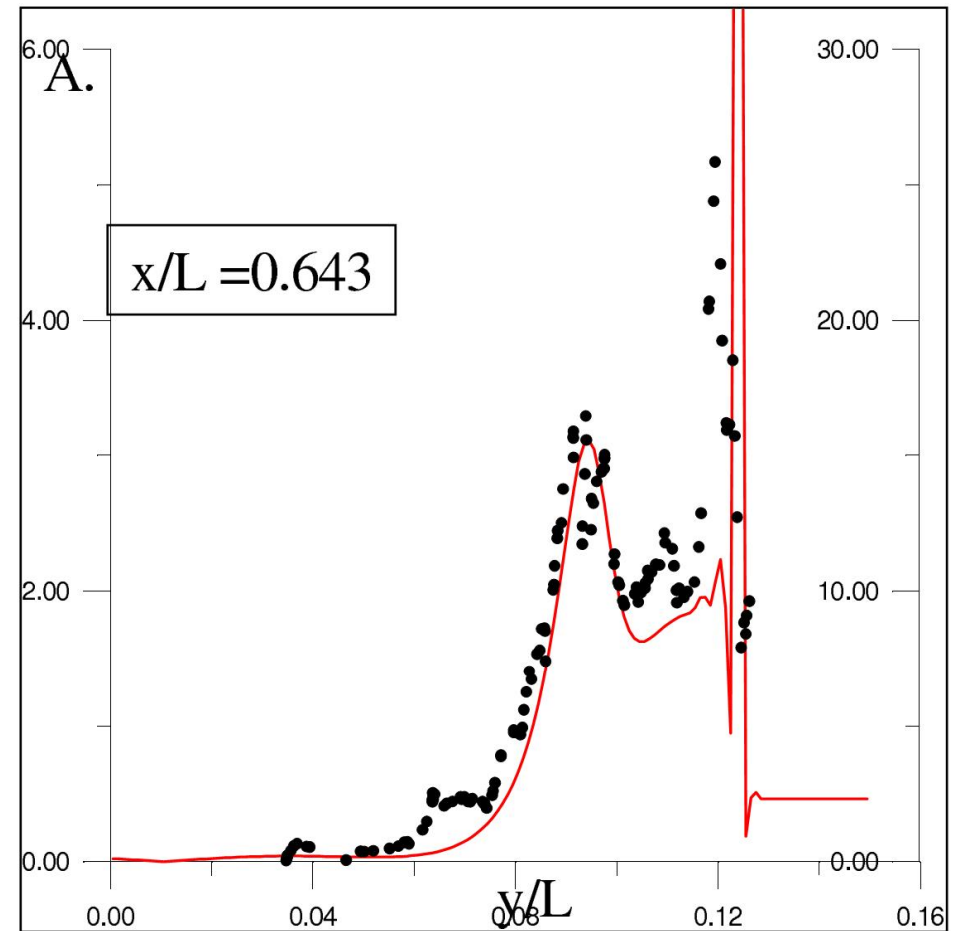


Экспериментальная фотография вязкого ударного слоя на плоской пластине при $M_\infty = 21$ и $Re_1 = 6 \cdot 10^5$ (гиперзвуковая азотная труба Т-327А).

Средние и пульсационные характеристики

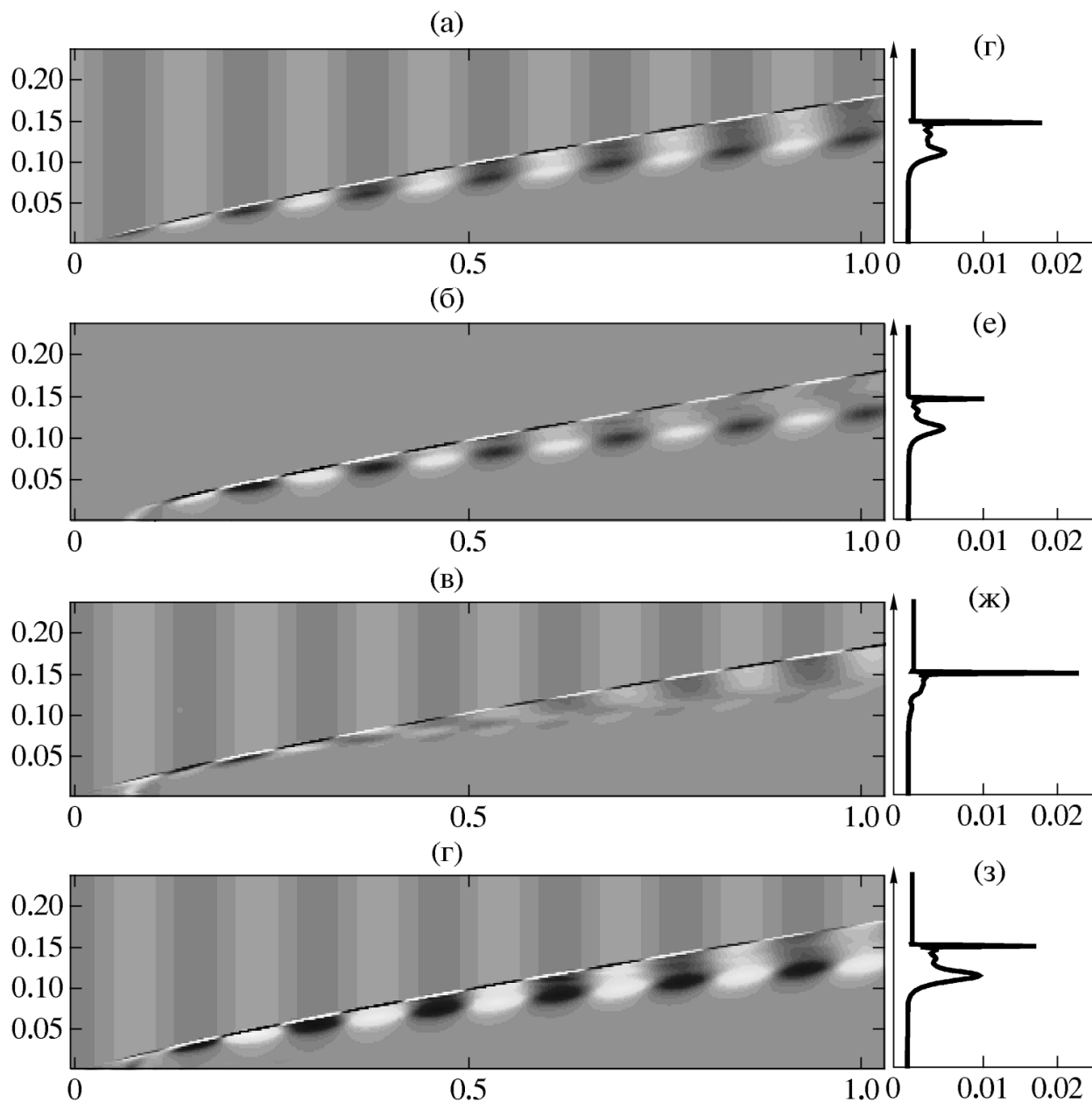


Профиль полного давления



Профиль пульсаций плотности

Управление развитием возмущений



Слева, сверху вниз:

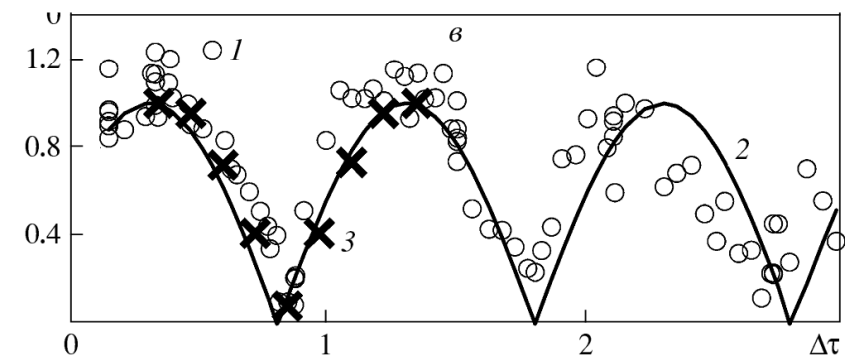
возбуждение звуком

возбуждение вдувом-отсосом

возбуждение в противофазе

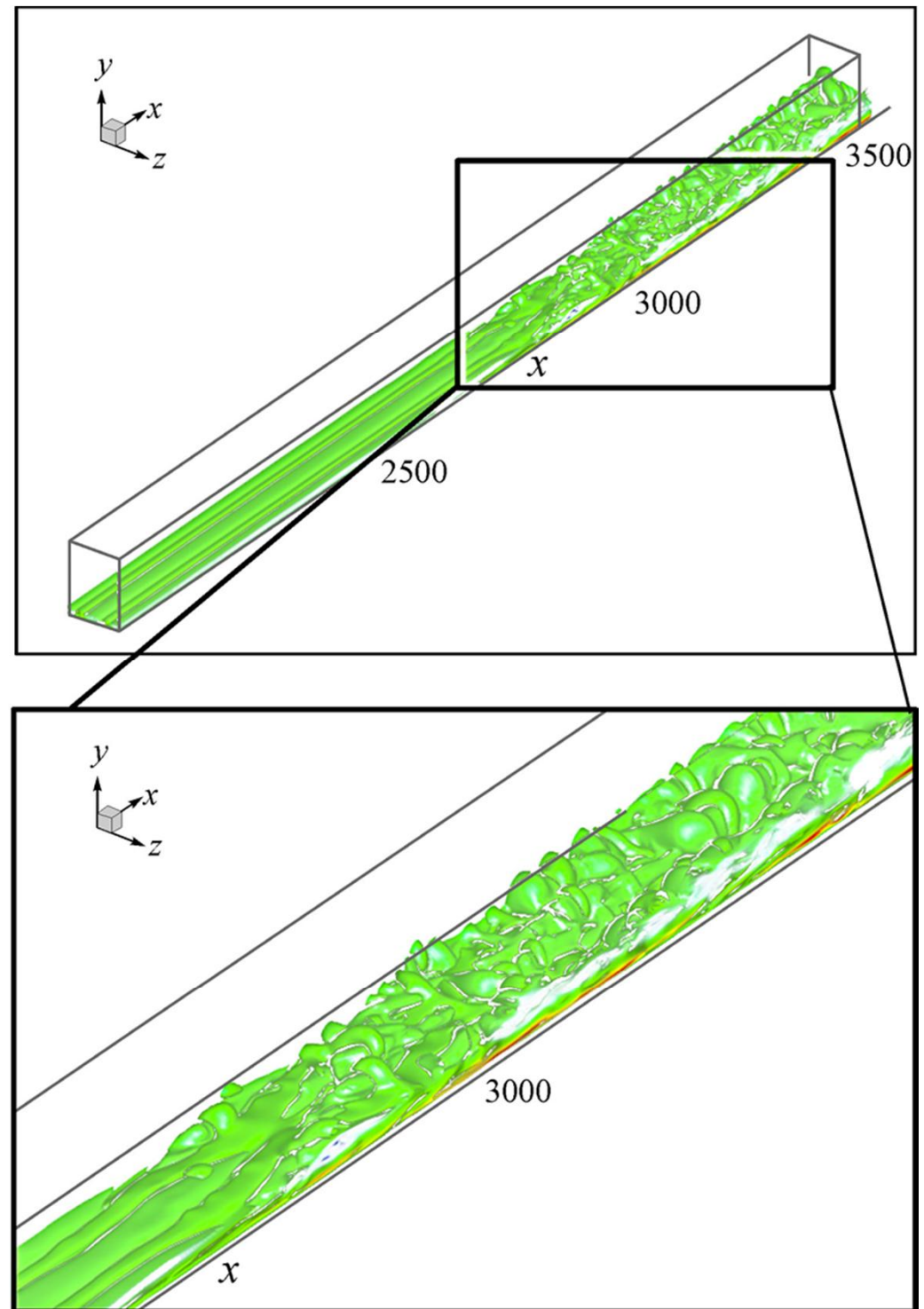
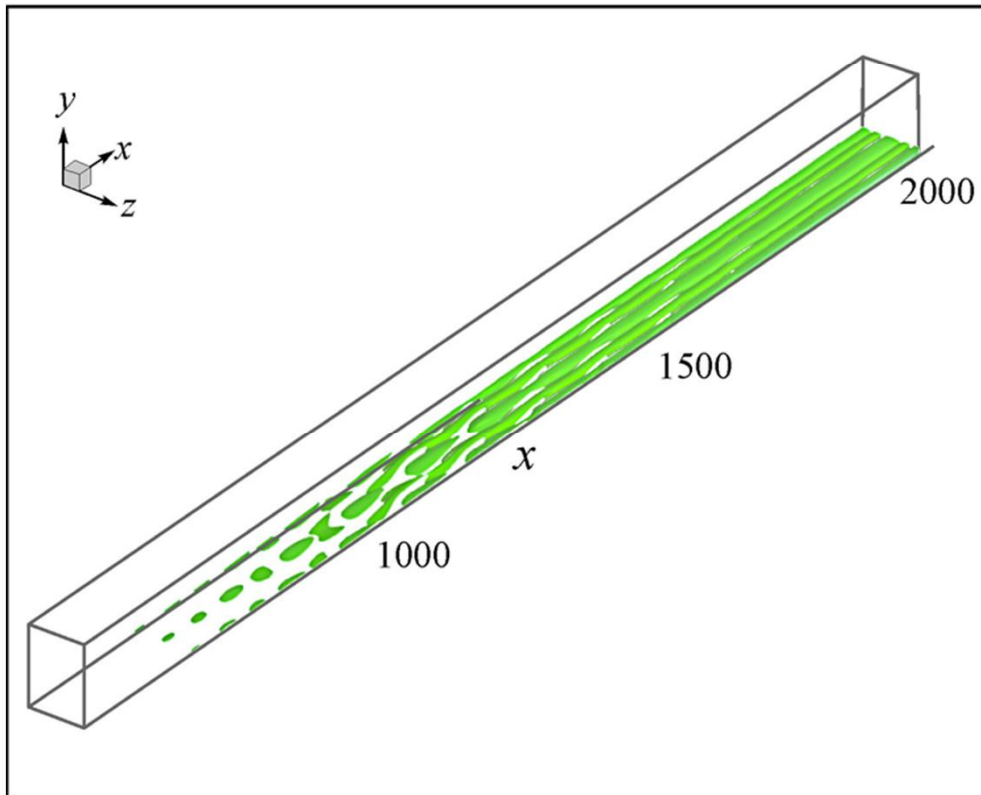
синфазное возбуждение

Зависимость амплитуды
возмущений от разности
фаз

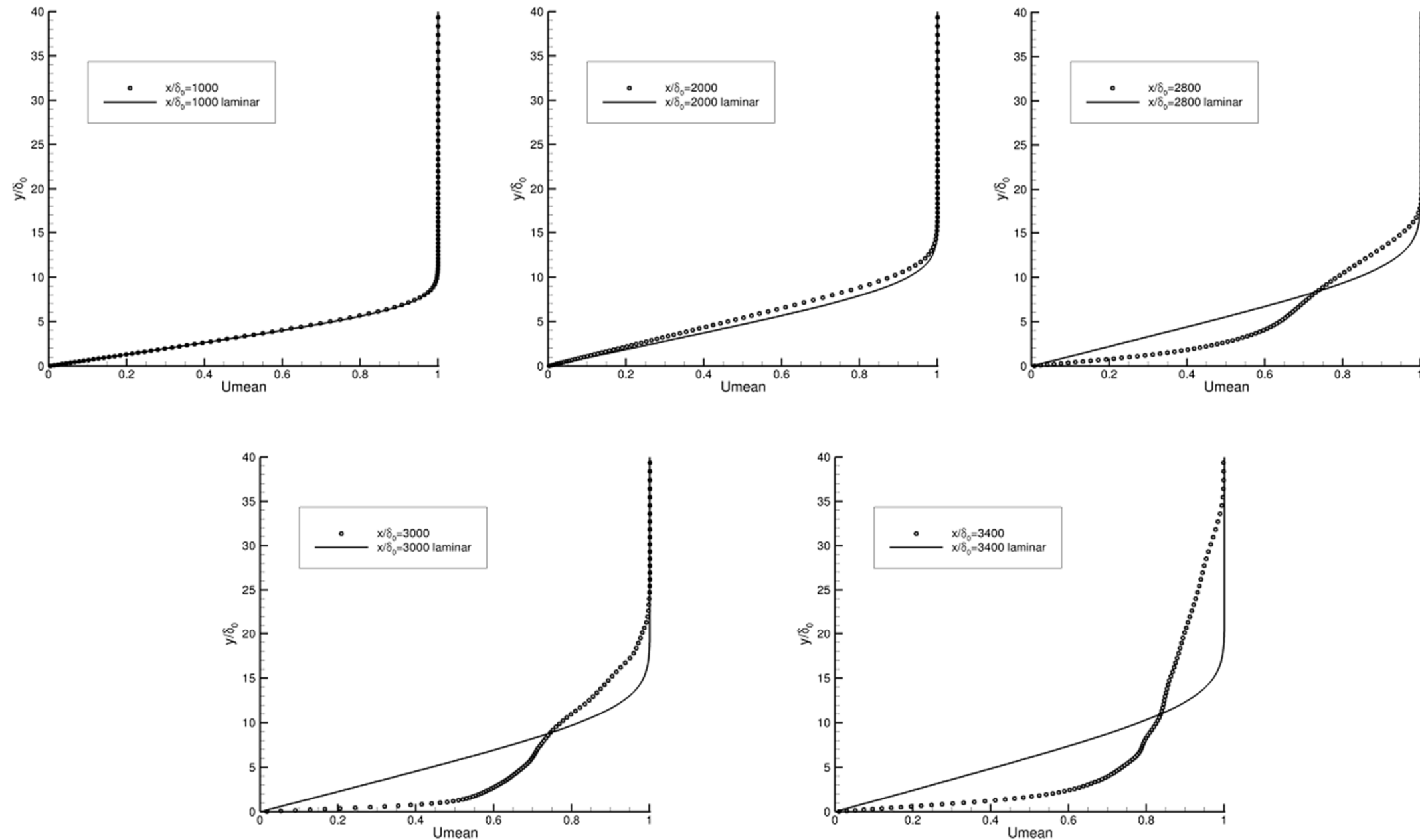


Переход к турбулентности в пограничном слое на плоской пластине, $M = 2$

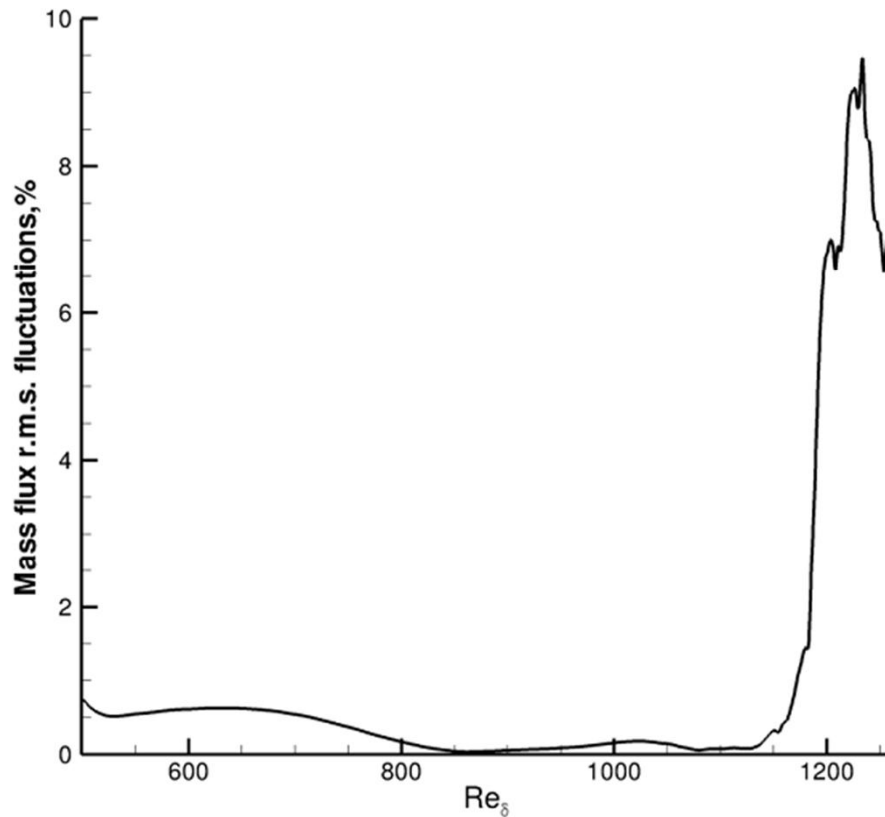
Изоповерхности пульсаций
продольной скорости
 $Re_{\delta_0} = 500$, $\chi = 55^\circ$, $A = 0.005$



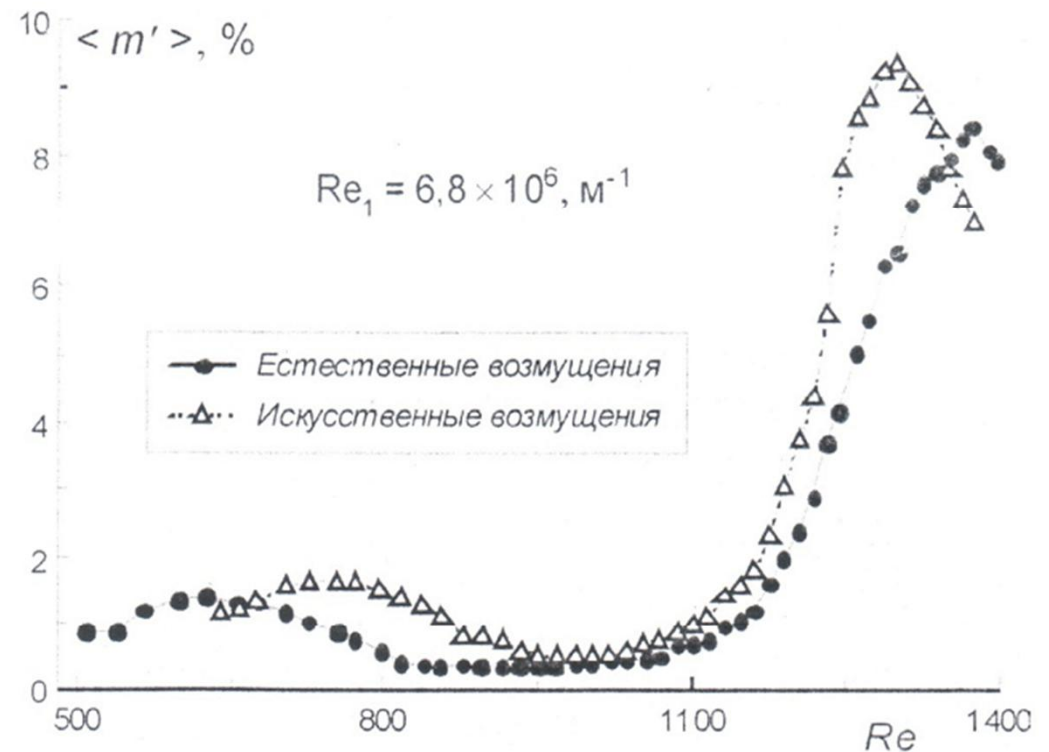
Профили средней скорости в различных сечениях



Среднеквадратичные пульсации массового расхода в расчете и эксперименте

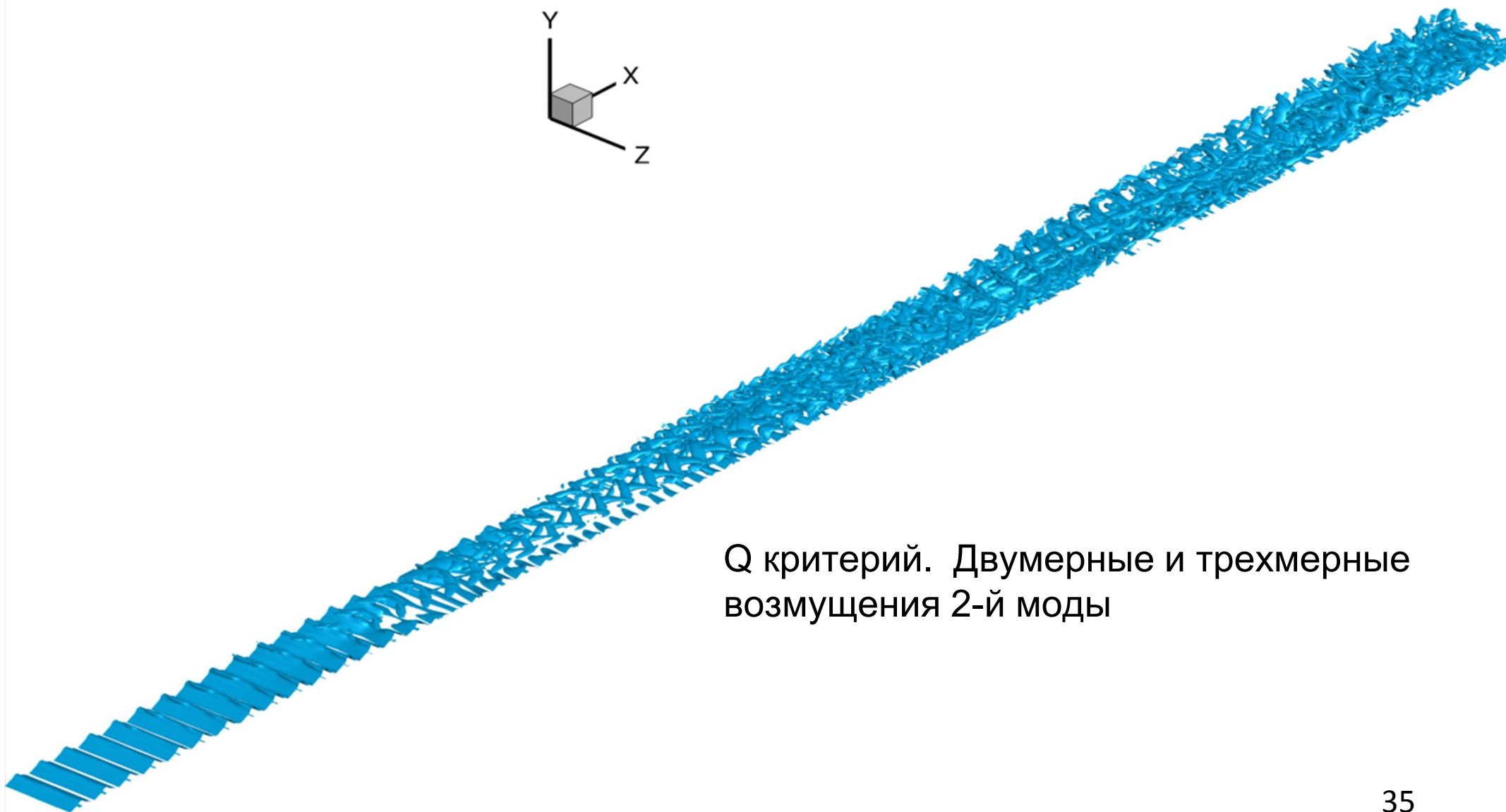


Численное моделирование
(Кудрявцев, Хотяновский, 2011)

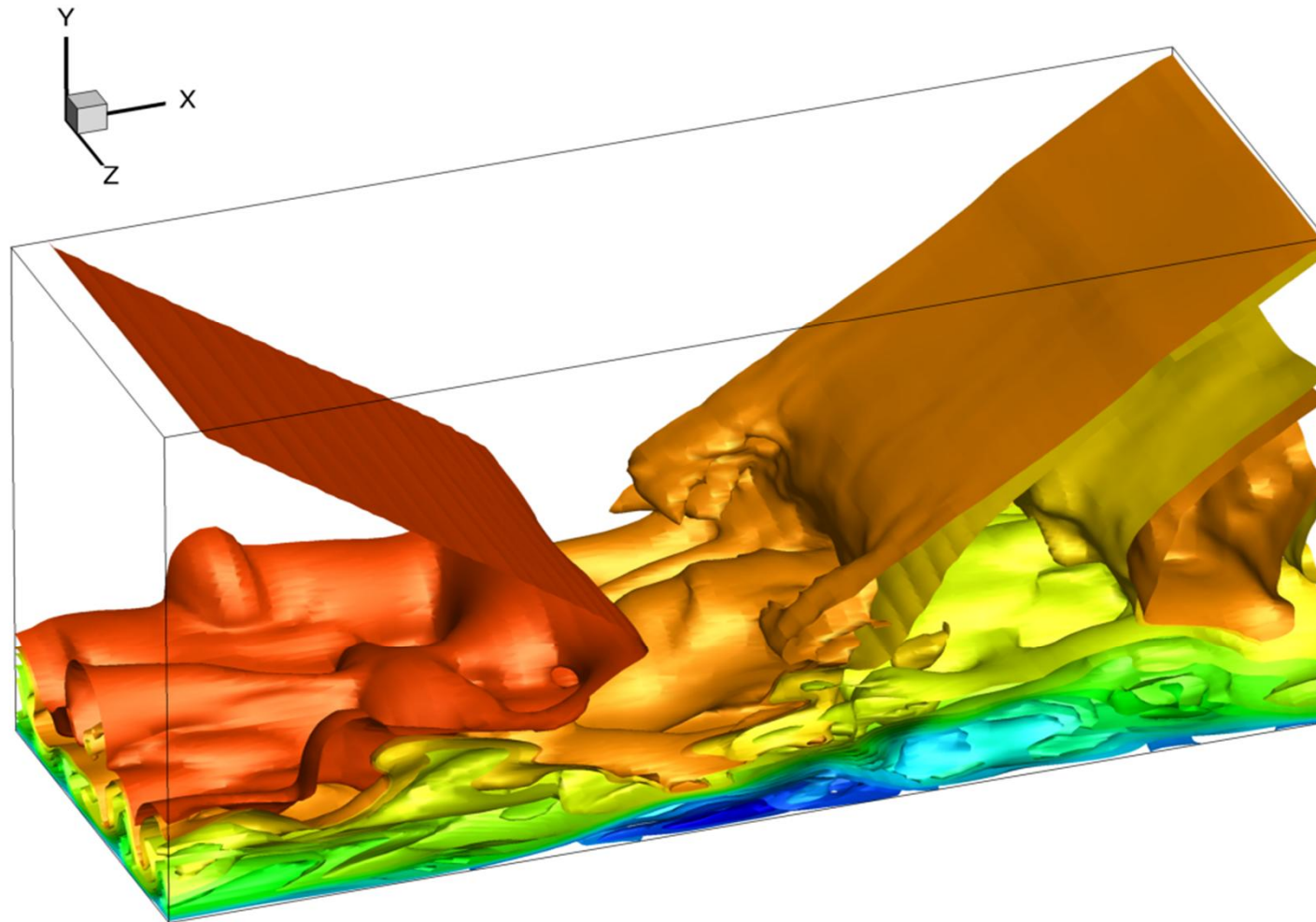


Эксперимент
(Ермолаев, Косинов, Семенов, 2008)

Переход к турбулентности в сверхзвуковом пограничном слое на плоской пластине, $M = 6$



Взаимодействие ударной волны с неустойчивым пограничным слоем



Взаимодействие ударной волны с переходным пограничным слоем при $M=2$. Мгновенные изоповерхности продольной скорости

Публикации

- ❑ *Journal of Fluid Mechanics (2), Physics in Fluids, Progress in Aerospace Science, AIAA Journal (4), Journal of Scientific Computing, Microfluidics and Nanofluidics, Journal of Turbulence, Journal of Spacecraft and Rockets, Shock Waves (6) etc* – всего ≈ 45 статей в журналах

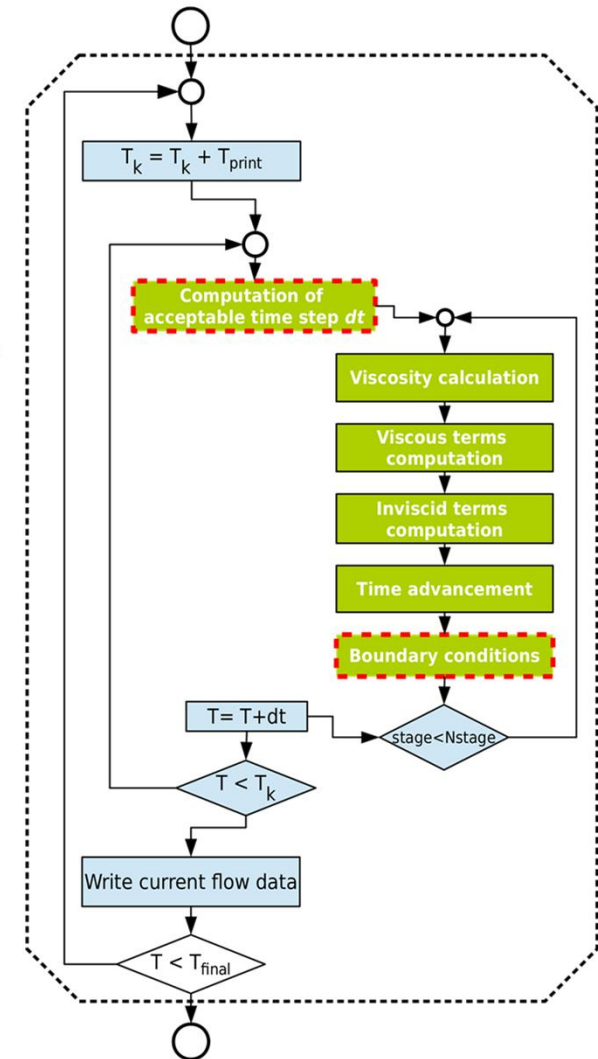
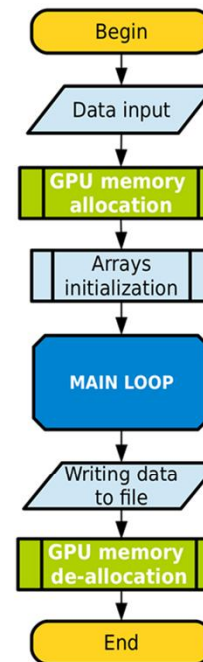
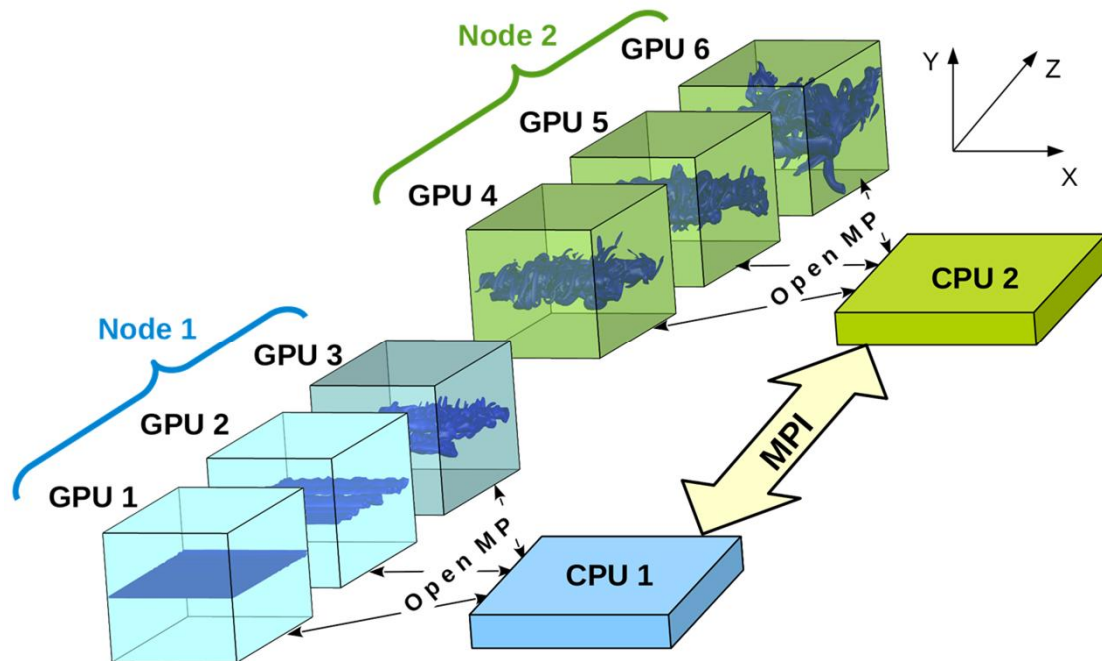
Защиты

- ❑ *А.Н. Кудрявцев, Т.В. Поплавская* (докторские диссертации)
- ❑ *А.-S. Mouronval, Р.Д. Рахимов, Д.В. Хотяновский, Д.Б. Эпштейн, А.А. Шершнев, С.В. Кирилловский* (кандидатские диссертации и PhD)

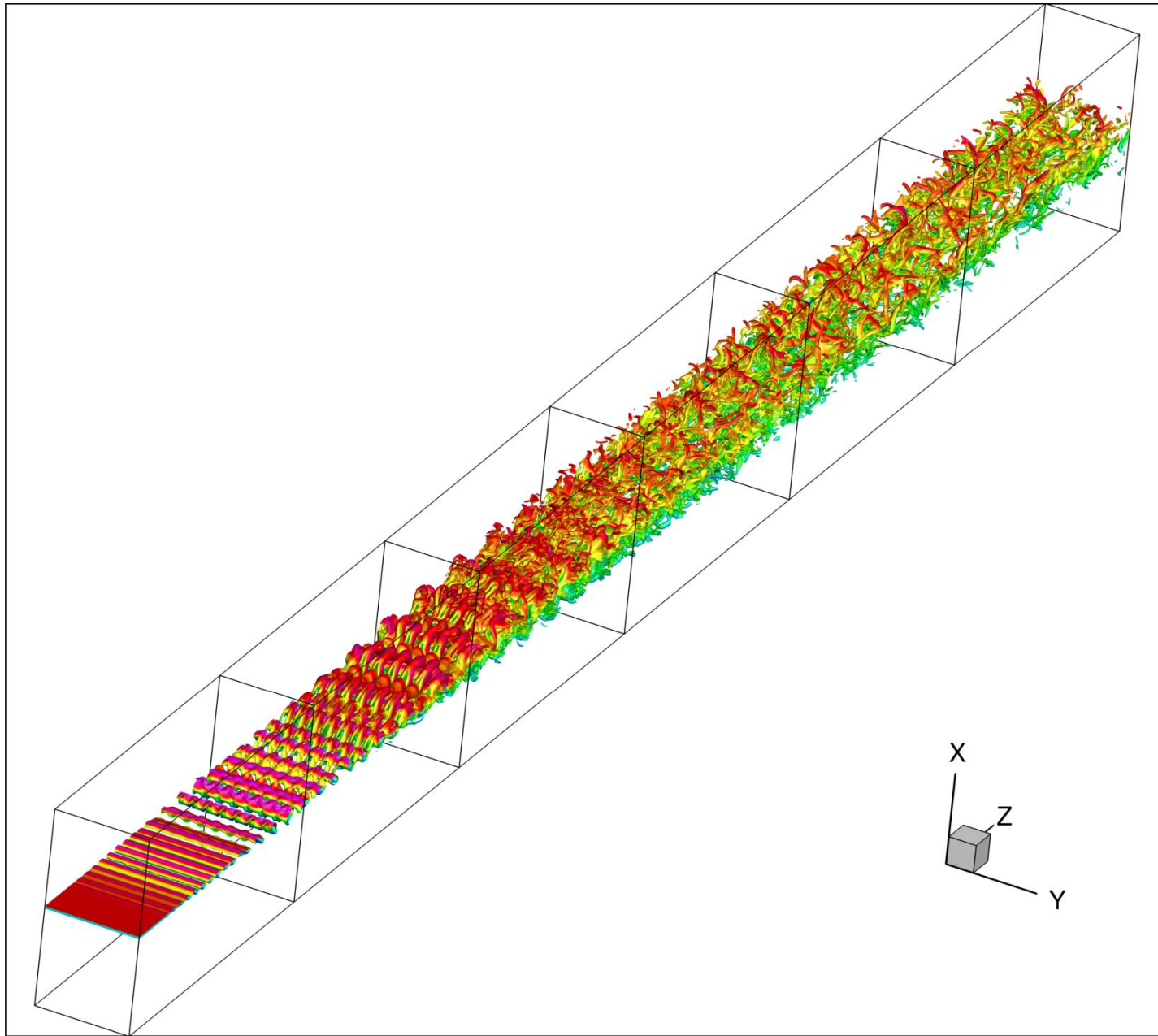
HyCFS

- ❑ Новая версия программного комплекса, предназначенная для проведения расчетов на компьютерах гибридной архитектуры, включающих графические ускорители
- ❑ **Разработчики:** *А.В. Кашковский, А.А. Шершнев*
- ❑ **Внешние пользователи:** *Е.Ю. Карцева (ЦНИИМаш)*
- ❑ CUDA 6/7
- ❑ Данные между GPU распределяются путем геометрической декомпозиции расчетной области на блоки
- ❑ Три уровня параллелизации:
 - Вычисления в каждом блоке выполняются параллельно с помощью CUDA;
 - Обмен данными внутри одного вычислительного узла организован с помощью OpenMP;
 - Для обмена между узлами используется MPI
- ❑ Требования к памяти при проведении вычислений с двойной точностью: примерно 300 кб на одну ячейку расчетной сетки

Организация вычислений



Переход к турбулентности в слое смешения



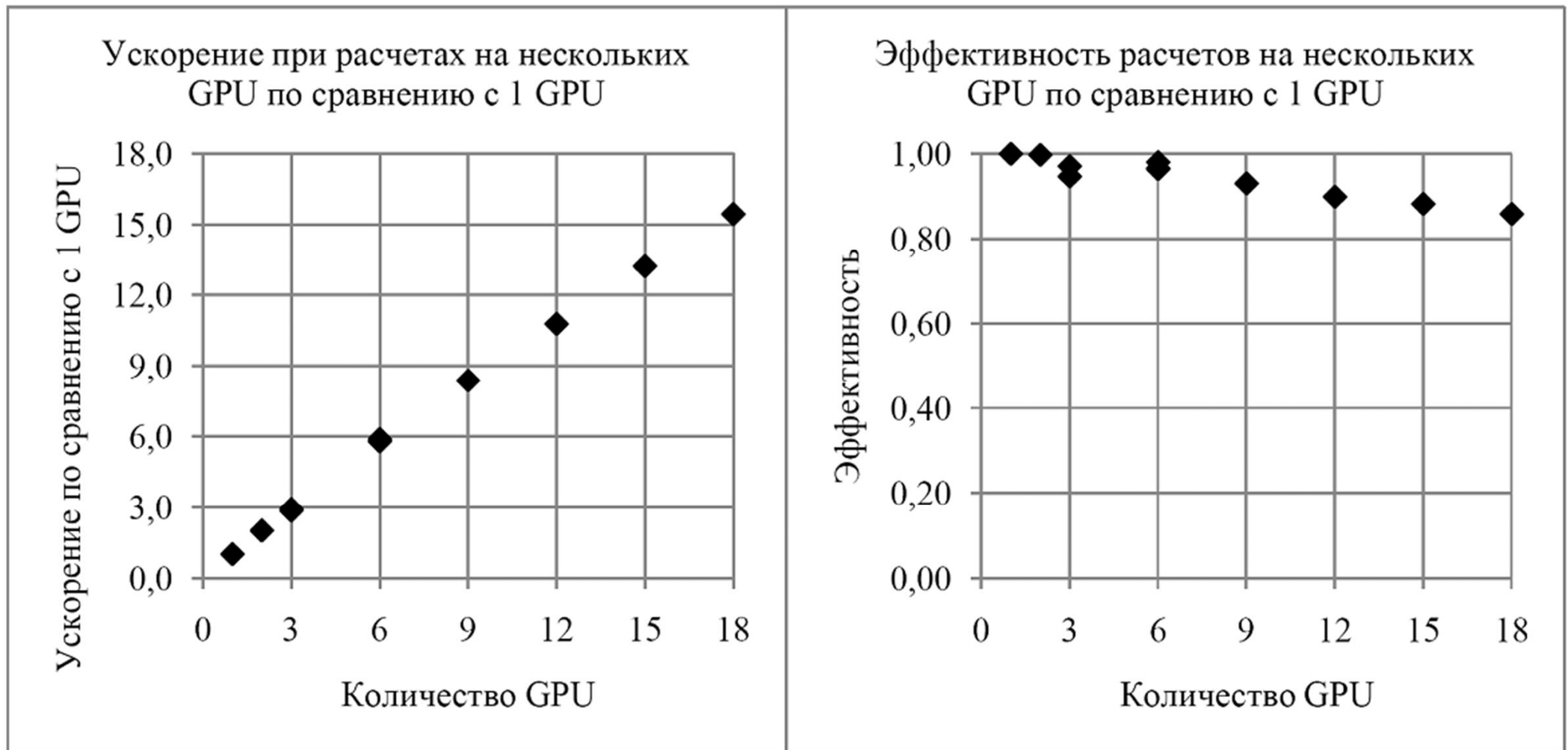
Изоповерхности
модуля завихренности,
раскрашенные в
соответствии с значением
числа Маха

$$M_1 = 2.5, M_2 = 1.5$$

6 GPU

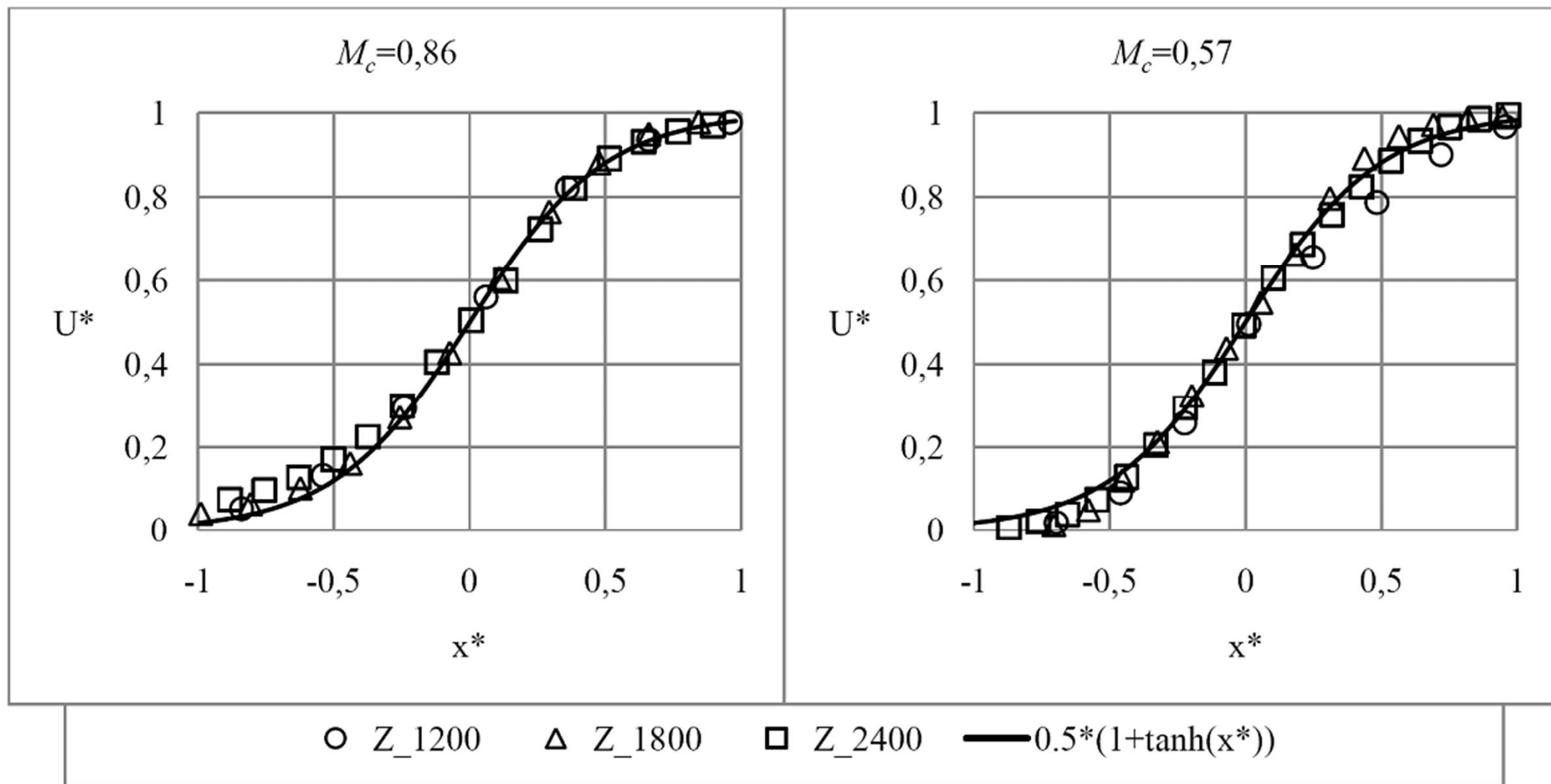
72 млн. расчетных ячеек

Ускорение



Вычисление конвективных членов $\approx 76\%$, вычисление вязких членов $\approx 10\%$, обмен между процессорами $\approx 10\%$

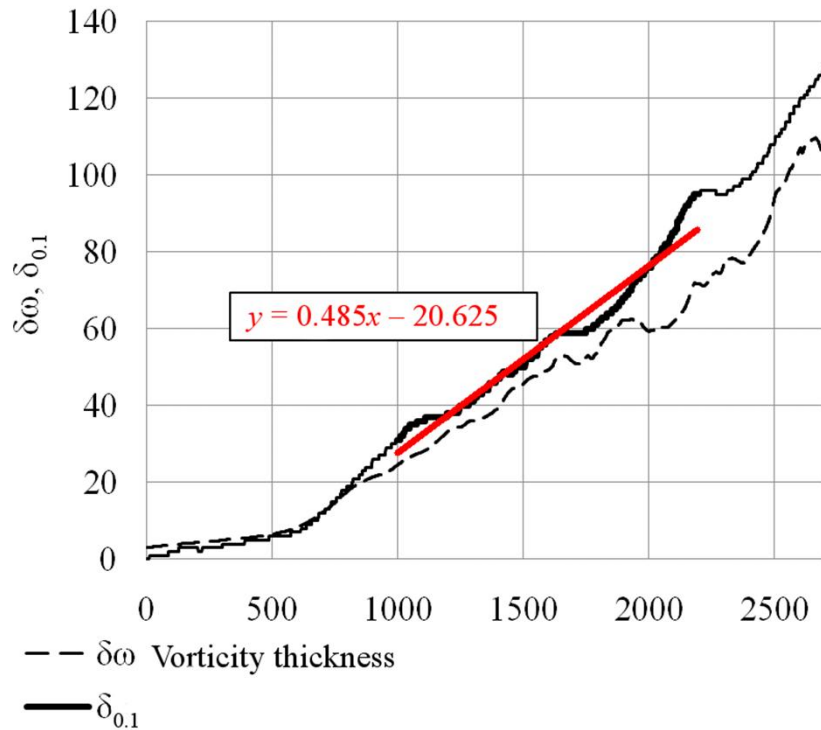
Характеристики среднего течения



Профили продольной скорости

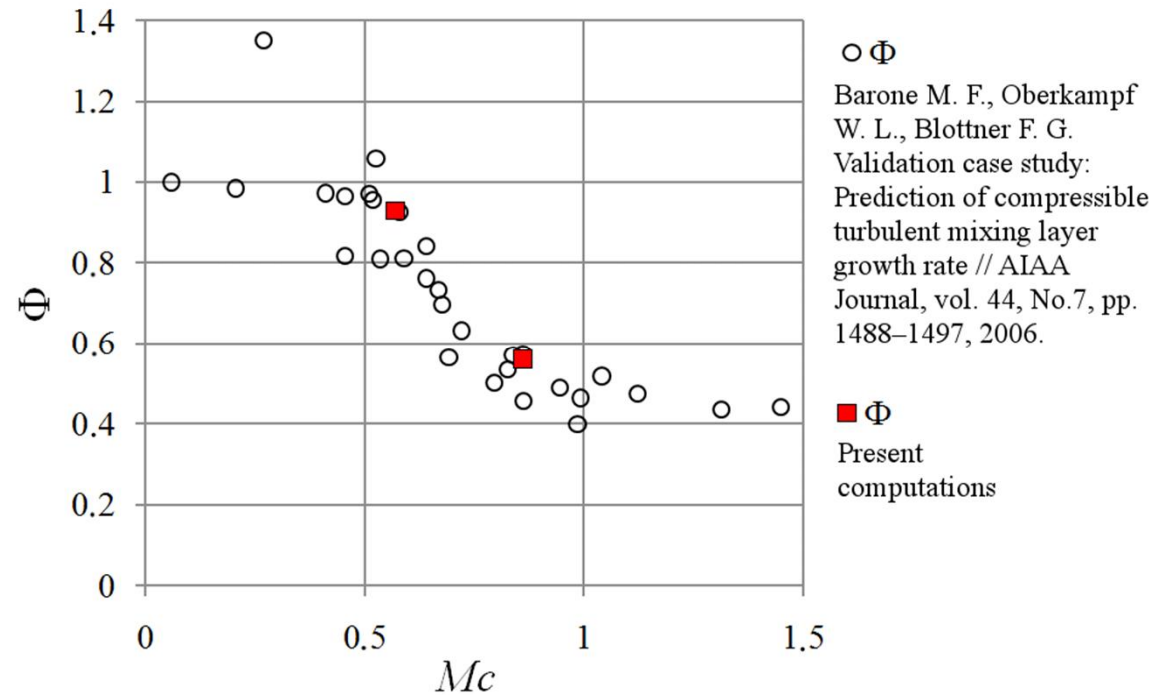
Характеристики среднего течения

$$Mc = 0.86$$



Толщина слоя смешения
в зависимости от продольной
координаты

$$\delta_\omega = \frac{U_1 - U_2}{[\partial U / \partial x]_{max}}$$



Скорость расширения, нормированная
на скорость расширения несжимаемого
слоя смешения

$$\Phi = \frac{d\delta_{0.1}/dz}{(d\delta_{0.1}/dz)_i}$$

**Спасибо за ваше
внимание!**