

БЕССЕТОЧНЫЙ КОД, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

С.В. Гувернюк

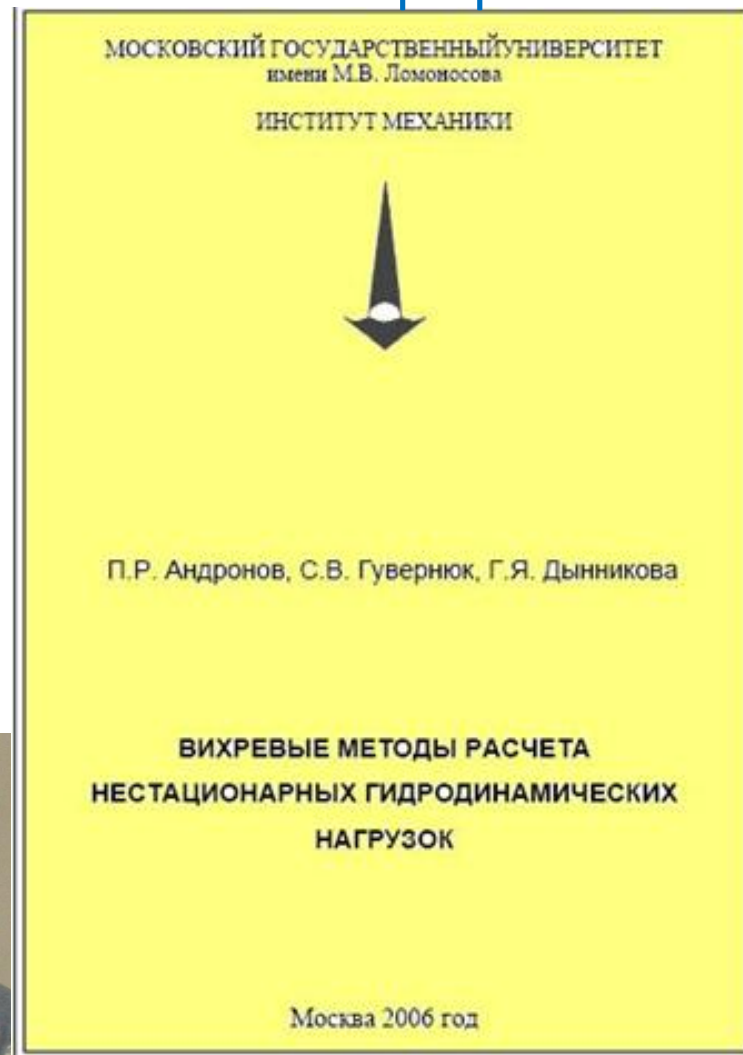
**МГУ имени М.В. Ломоносова,
НИИ механики МГУ**

Москва - 2014

команда



монография



Свидетельства о регистрации прав на программное обеспечение:

- **Ротор** # 2007612503, 14 июня **2007** г.
- **VVHDFlow** # 2010616504, 30 сентября **2010** г.
- **Vvflow** # 2013617441, 14 августа **2013** г.



Диссертации:

- Григоренко - **2008** (канд.)
- Гирча – **2009** (канд.)
- Дынникова – **2011** (докт.)
- Малахова – **2012** (канд.)

Общая характеристика кодов (1)

- **Модель среды:** ВНЖ (ИНЖ), 2D/3D; теплопроводность, внешние массовые силы, наличие дисперсной фазы.
- **Тела:** твердые подвижные, многозвенные с шарнирными упругими и др. связями, деформируемые поверхности.
- **Уравнения:** УрЧП Н-С (Э), ОДУ ДТТ.
- **Граничные условия:** прилипание на твердых границах, точные условия затухания возмущений на бесконечности.

Общая характеристика кодов (2)

- **Численные методы:** лагранжевы
бессеточные оригинальной разработки:
2D ВВД/ВВДТД : $V - \Omega z$ (+T , p); $\Omega = \text{rot } V$. (MPI)
3D ВДД: $V - D$ (+T, p): $\text{rot } V = \text{rot } D$.
- **Назначение:** фундаментальные и
прикладные исследования :
«остро» нестационарные процессы,
динамически сопряженные задачи,
подвижные деформируемые границы,
вынужденная и свободная конвекция ...

Программные комплексы ROTOR и VVHDFlow на базе метода вязких вихревых и вихре-тепловых доменов (ВВД/ВВТД)

Назначение:

Решение двумерных уравнений Навье-Стокса вязкой несжимаемой жидкости и теплопроводности

Преимущества:

- **Отсутствие сеток (удобно решать задачи обтекания тел при их произвольном движении).**
- **Простота постановки граничных условий на бесконечно удаленном контуре**
- **Устойчивость численной схемы (не бывает авостов)**
- **Низкая численная диссипация**
- **Отсутствуют эмпирические и «подгоночные» параметры**
- **Метод позволяет решать сопряженные задачи гидродинамики и динамики тел без ограничений на инерционные свойства тел**

Особенности Метода Дипольных Доменов

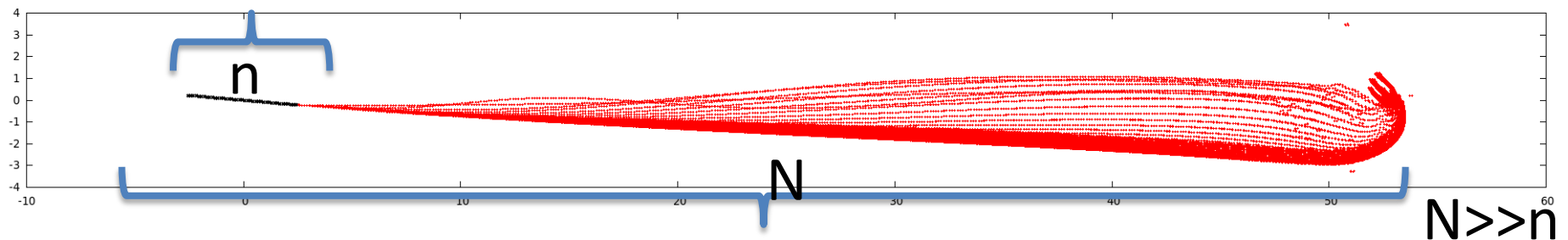
- Не нужно строить сетку (особенно актуально при изменяемой геометрии тел или их взаимного расположения)
- Самоорганизация расчетных точек (концентрируются в областях больших градиентов параметров)
- Автоматическое выполнение условий на бесконечности
- В отличие от трехмерных вихревых методов (вортонов, вихревых отрезков, вихревых зерен) :
 - У МДД отсутствует главная проблема трехмерных вихревых методов связанная с нарушением соленоидальности модели поля завихренности составленного из дискретных вихревых элементов
 - МДД обеспечивает выполнение закона сохранения импульса

Архитектура

- Массивно-параллельное **MPI/OpenMP/CUDA** ядро подключающее в процессе компиляции модули с логически разными частями комплекса (решение СЛАУ, расчет сил, сохранение результатов, расчет взаимодействий дипольных элементов)
- Модульная архитектура позволяет сравнивать разные версии модулей, реализующих один и тот же функционал между собой и валидировать их между собой
- Предметная задача упаковывается в динамическую библиотеку, подхватываемую комплексом в процессе выполнения. Комплекс берет из интерфейсов данной библиотеки все необходимые параметры для ведения расчета. Сама библиотека может быть последовательной без ущерба для производительности комплексу.

Главные вычислительные сложности

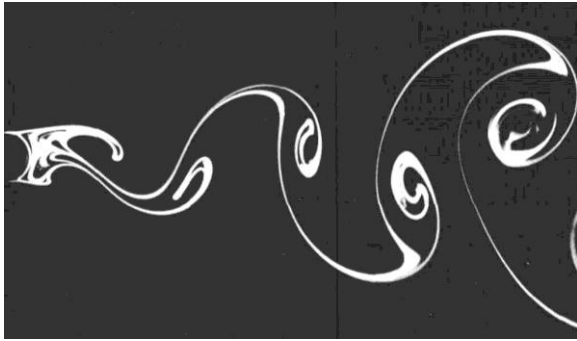
1. Перемещение дипольных частиц и изменение их моментов (Задача N тел, сложность $N*N \rightarrow$, быстрый метод \rightarrow сложность $N \log N$)
2. Нахождение параметров новых диполей для удовлетворения граничных условий (СЛАУ, сложность $n^3 \rightarrow$ итеративный решатель \rightarrow сложность $\rightarrow n \log n$)



В случае неизменной геометрии

- Один раз обращается матрица - сложность порядка n^3
- Затем на каждом шаге с ее помощью быстро удовлетворяются граничные условия
- Используется параллельный решатель ScaLAPACK

Бессеточный метод ВВД / ВВДТ



Эксперимент Ван-Дайка:
визуализация молоком



ВВД: визуализация
пассивной примесью

Динамика ближнего следа

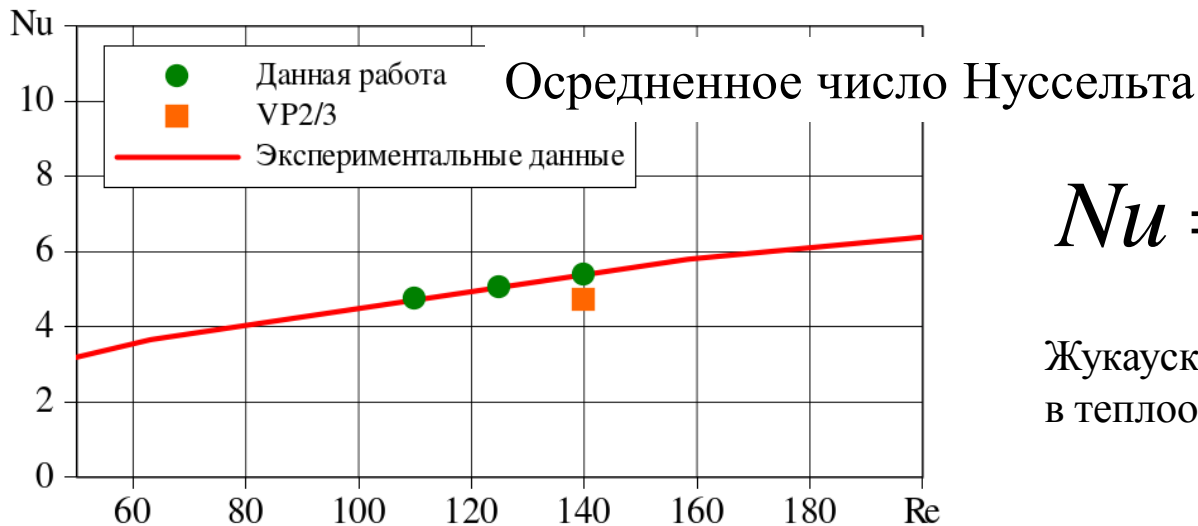
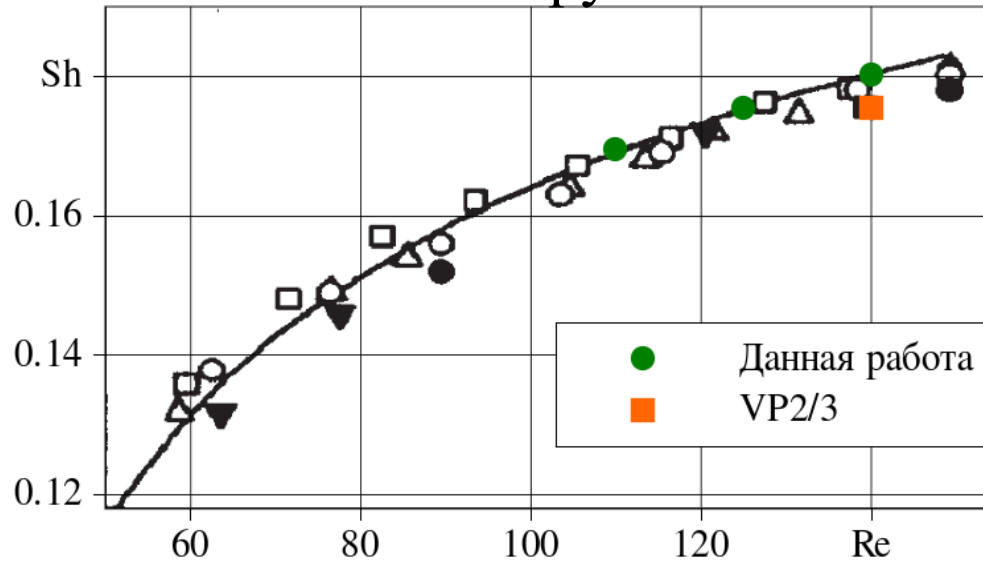
t = 0.055

Анимация:
ВД+streaklines
при $Re=140$

Обтекание неподвижного нагретого цилиндра

$Re=140$
 $Pr=0.72$

Число Струхала

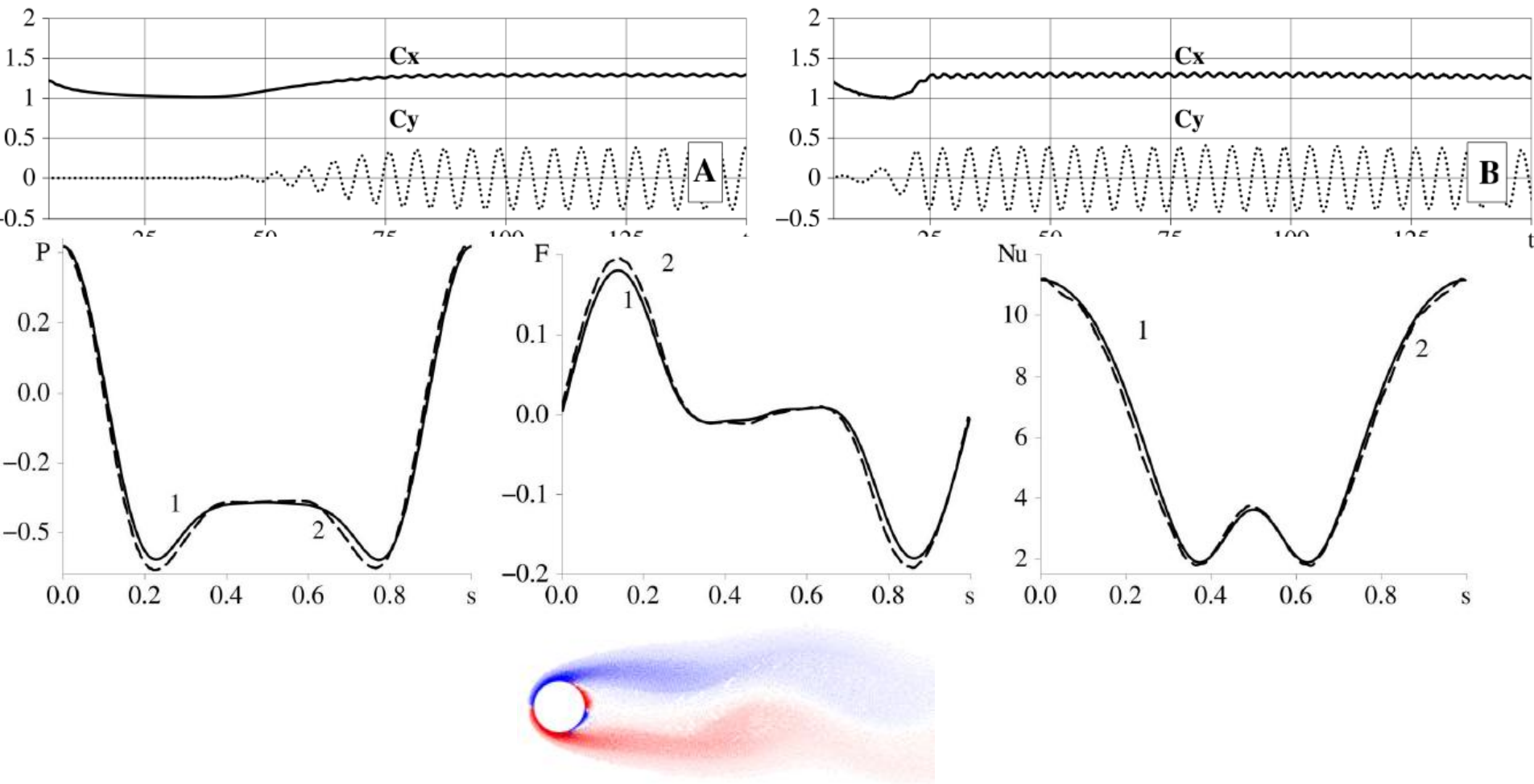


$$Nu = 0.52 Re^{1/2} Pr^{0.37}$$

Жукаускас А.А. Конвективный перенос
в теплообменниках 1982

Сеточные коды **VP2/3** (а) и бессеточные **VVHDFlow** (b)

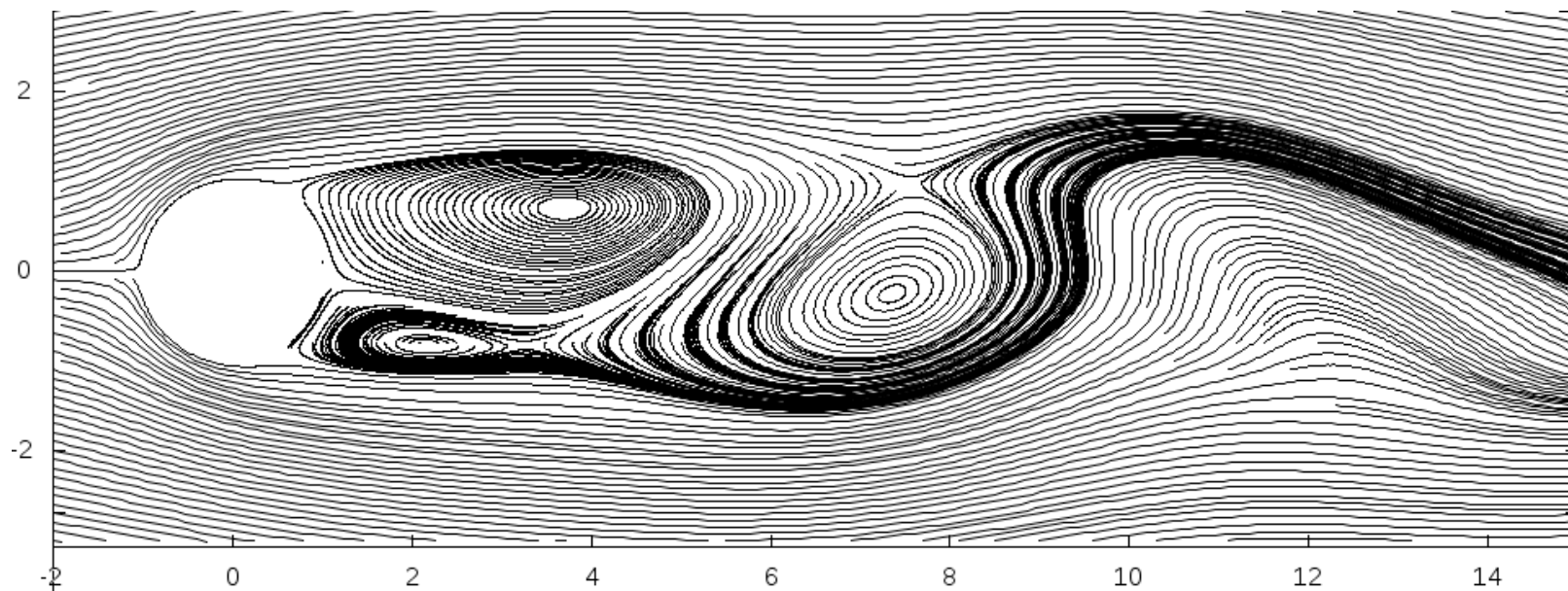
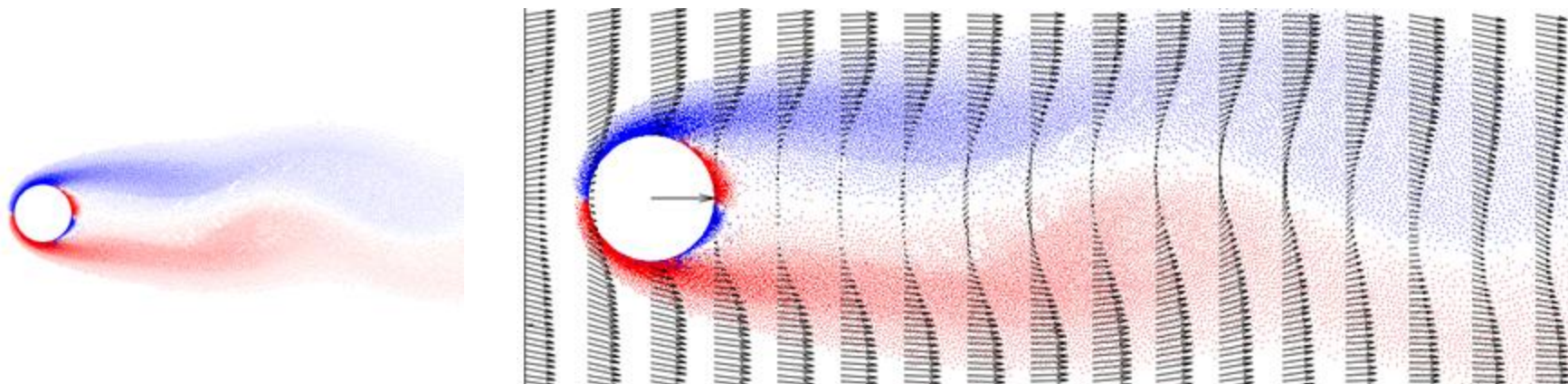
интегральные и распределенные нагрузки на цилиндр $Re=140$



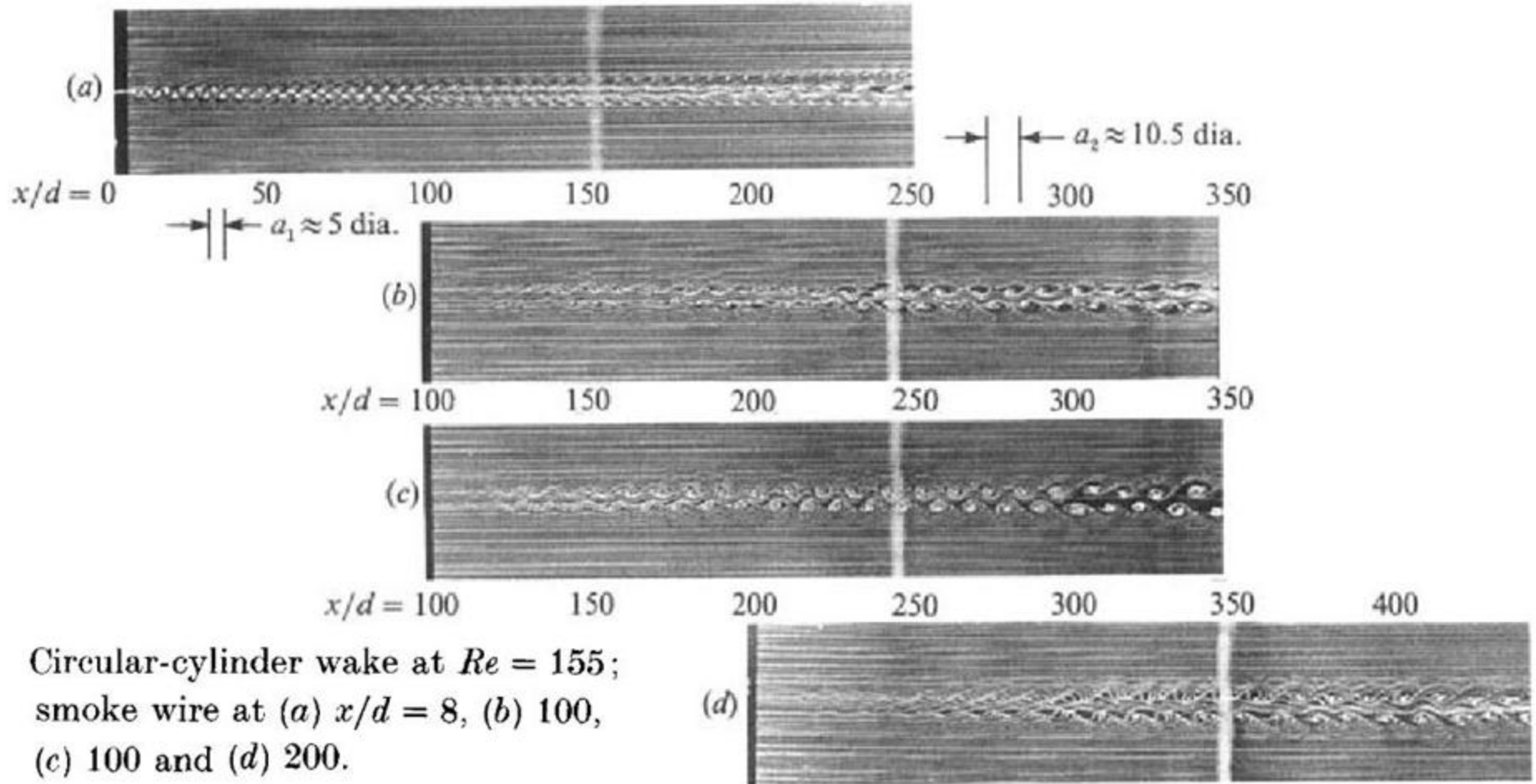
С.А. Исаев, С.В. Гувернюк, Т.В. Малахова. Решение уравнений Навье-Стокса и теплопроводности с помощью многоблочных эйлеровых и бессеточных лагранжевых вычислительных— Казань, **2012**. С. 191-196.

Re=150. Постпроцессор VVHDFlow:

вихревое поле, поле вектора скорости, линии тока



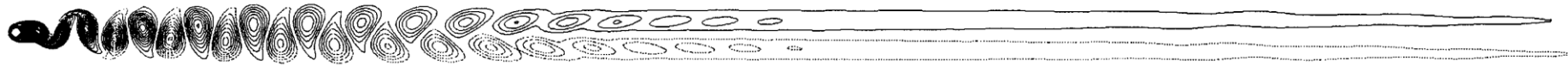
Явление перестройки вихревой дорожки - ЭКСПЕРИМЕНТ, $Re=155$



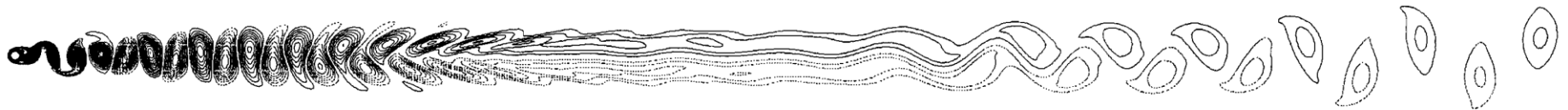
Cimbala J.M., Nagib H.M., Roshko A. Large structures in the far wakes of two-dimensional bluff bodies // **JFM. 1988.** Vol. 190. P. 265–298.

Явление перестройки вихревой дорожки

(a) $Re = 150$ -2D сеточный РАСЧЕТ, $Re=150$:- 1000



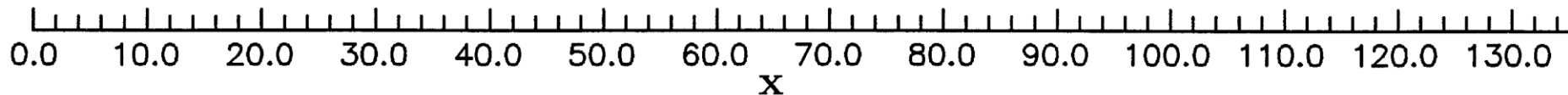
(b) $Re = 300$



(c) $Re = 500$



(d) $Re = 1000$

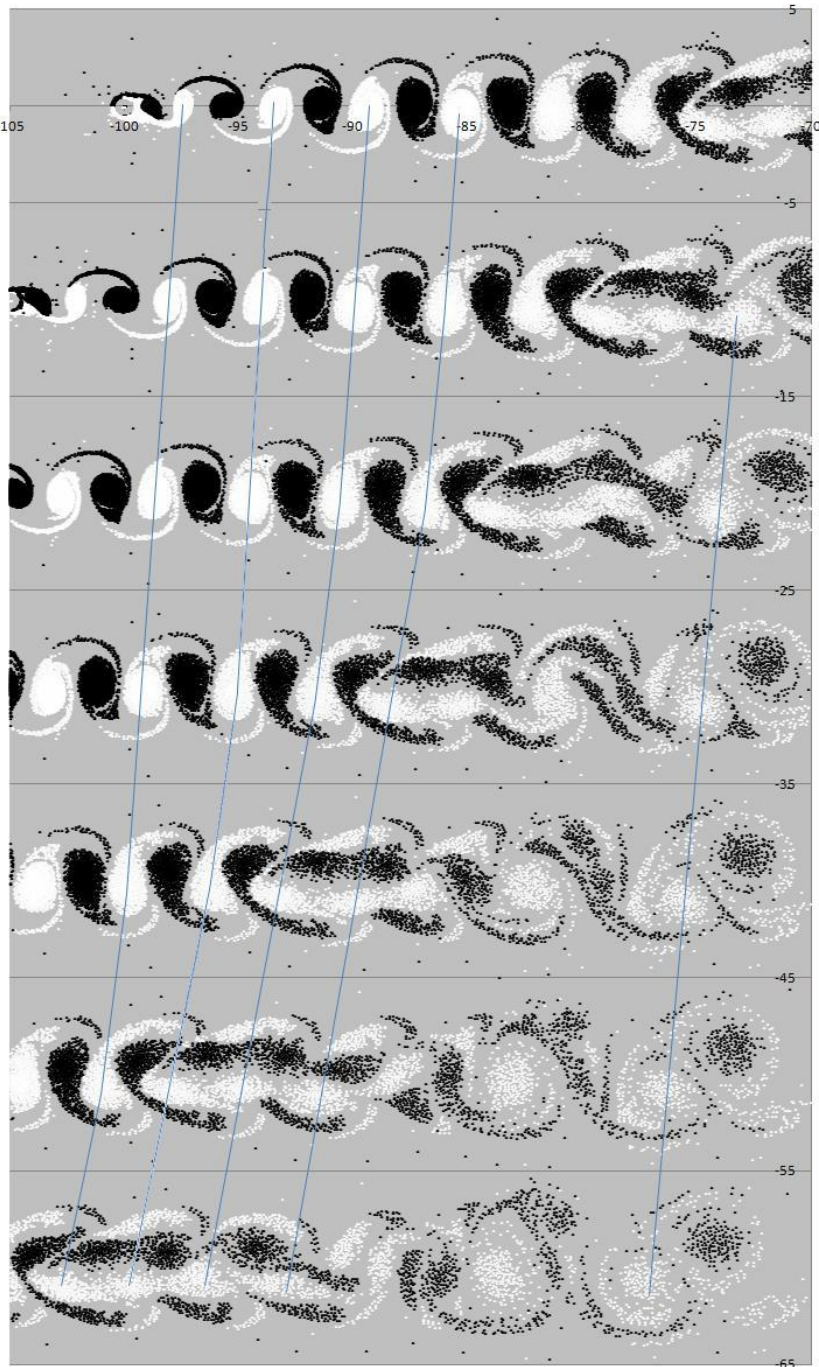


Inoue O., Yamazaki T. Secondary vortex streets in two-dimensional cylinder wakes //Fluid Dynamics Research. **1999.**

V. 25. Pp. 1 – 18.

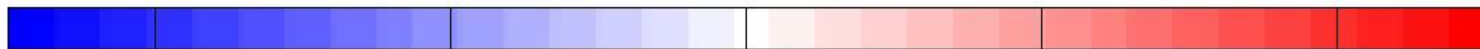
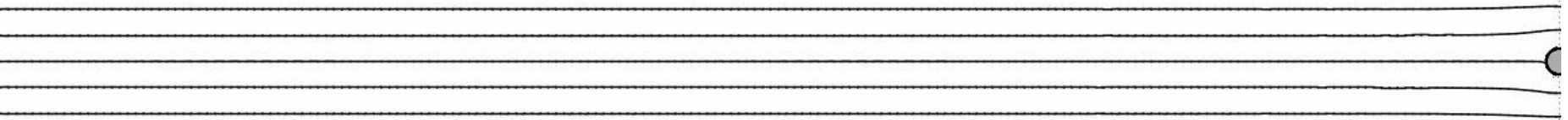
перестройка
дорожки Кармана
в дальнем следе
за цилиндром
при $Re = 600$

Последовательность
мгновенных вихревых
распределений



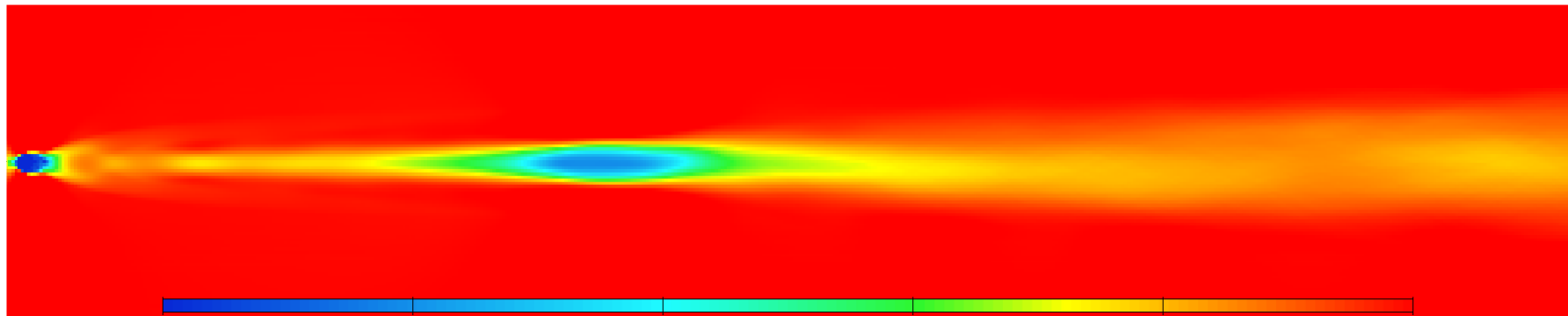
образование, развитие и перестройка дорожки Кармана в следе за цилиндром, коды **VVHDFlow**, $Re = 600$

$t = 0.100000$

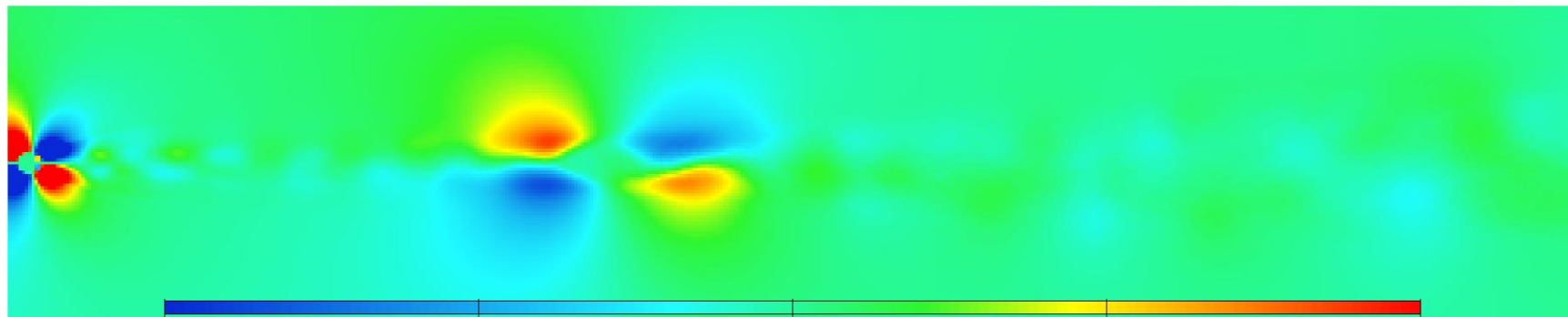


поля параметров ОСРЕДНЕННОГО ПО ВРЕМЕНИ течения

Re=600



поле продольной компоненты скорости $\langle V_x \rangle$

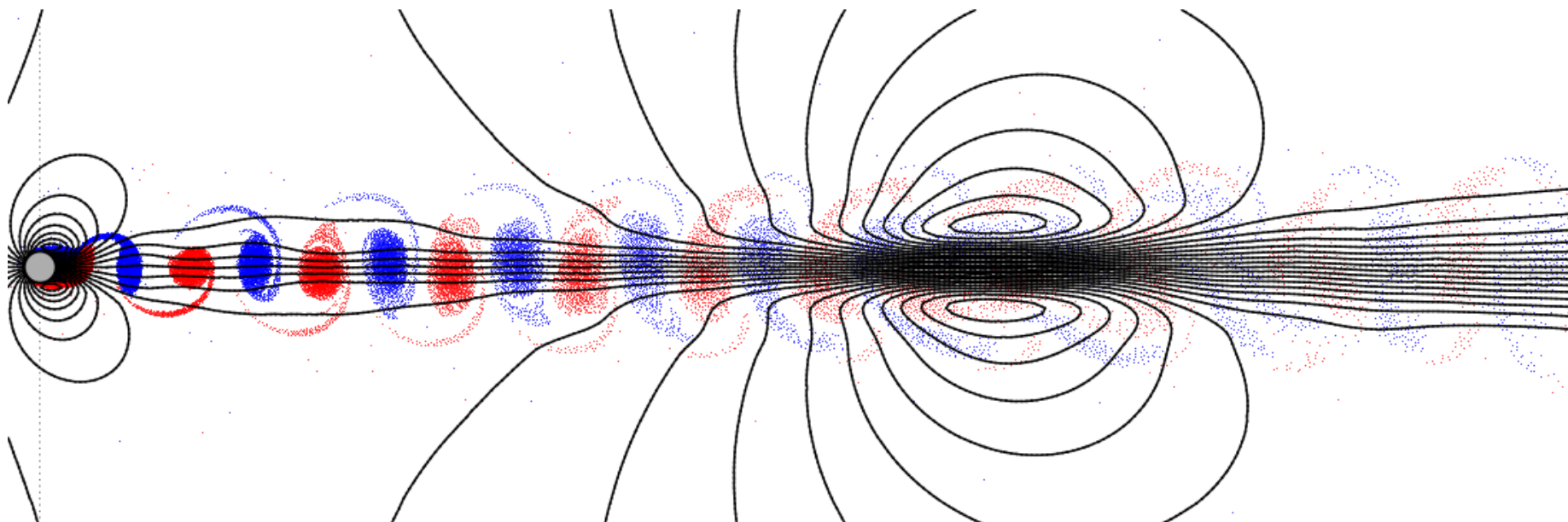
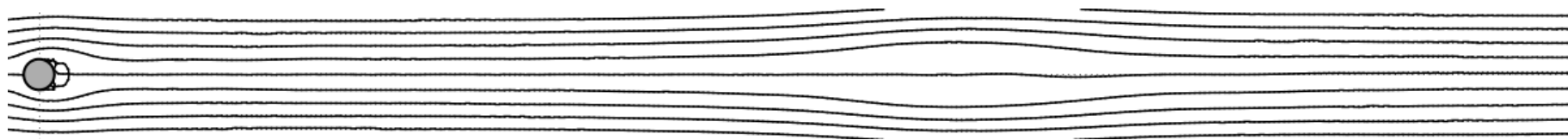


поле поперечной компоненты скорости $\langle V_y \rangle$

поля параметров ОСРЕДНЕННОГО ПО ВРЕМЕНИ течения

$Re=600$

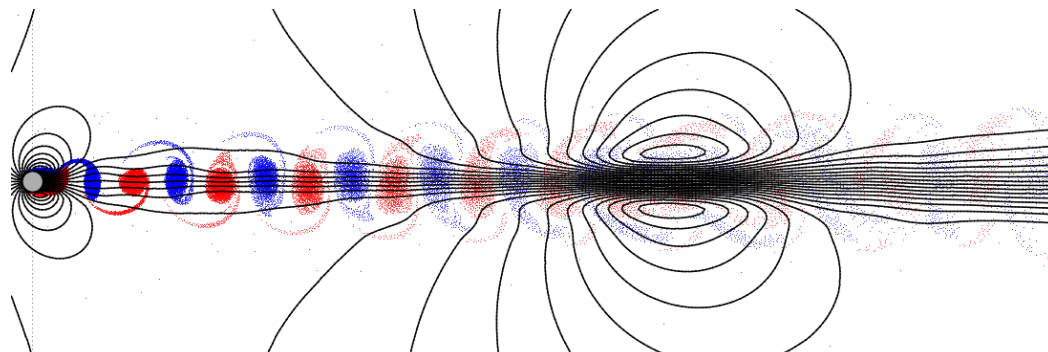
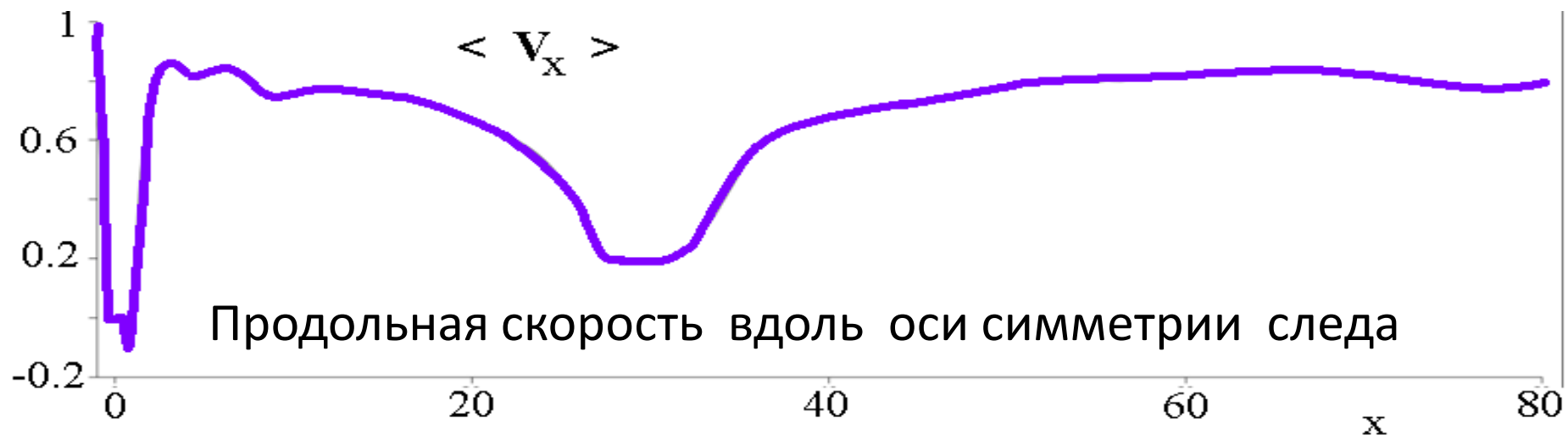
линии тока для $\langle V \rangle$



линии тока для $\langle V \rangle - V_0$

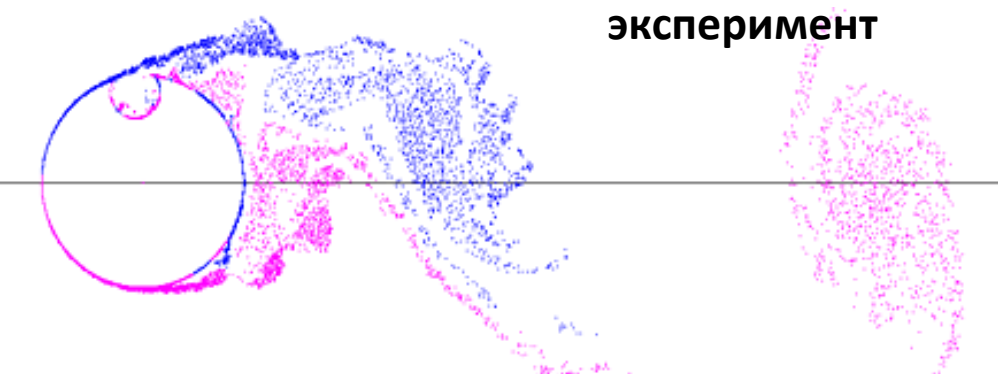
поля параметров ОСРЕДНЕННОГО ПО ВРЕМЕНИ течения

Re=600

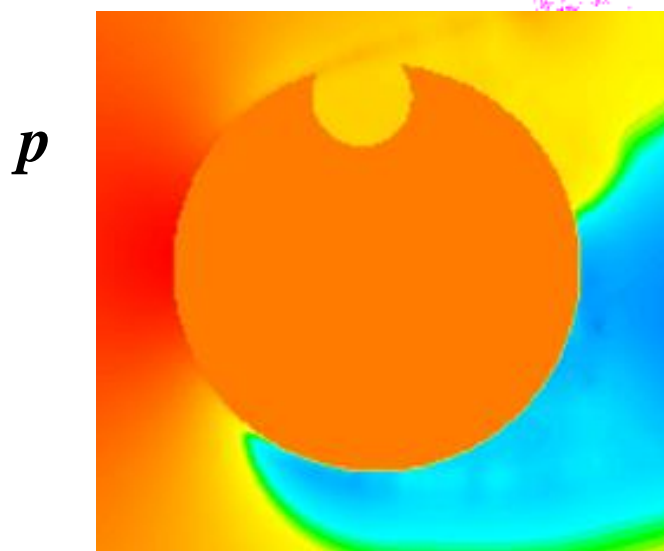




Шлирен-визуализация
обтекания цилиндра с
вихревой ячейкой ,
 $Re = 10^6$, $M = 0.5$
Гувернюк С.В. ,
Березенцев М.Ю. и др. 2001 г.



эксперимент

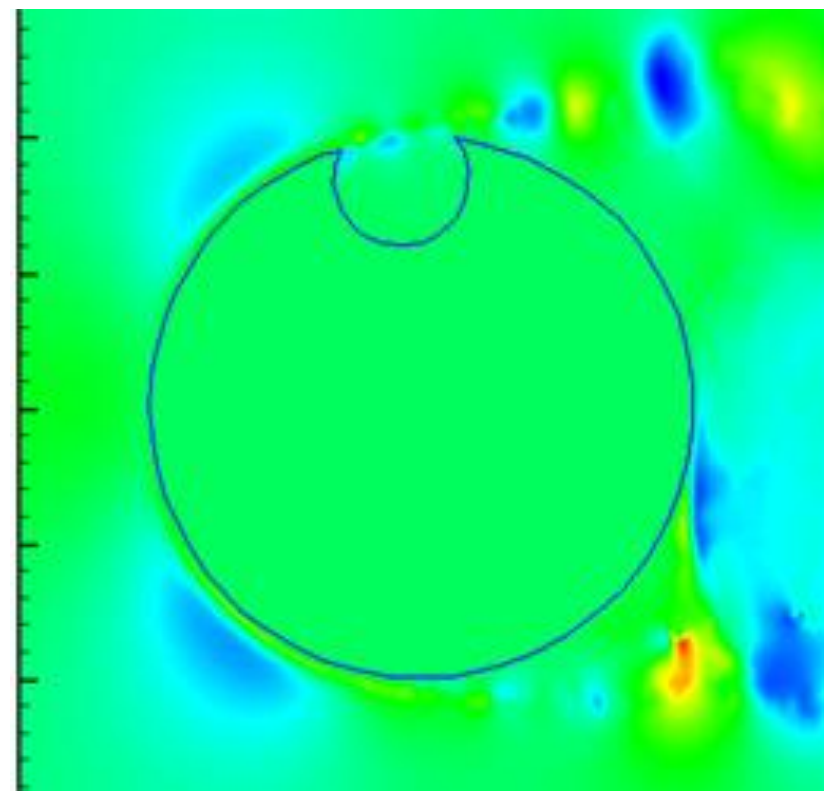


p

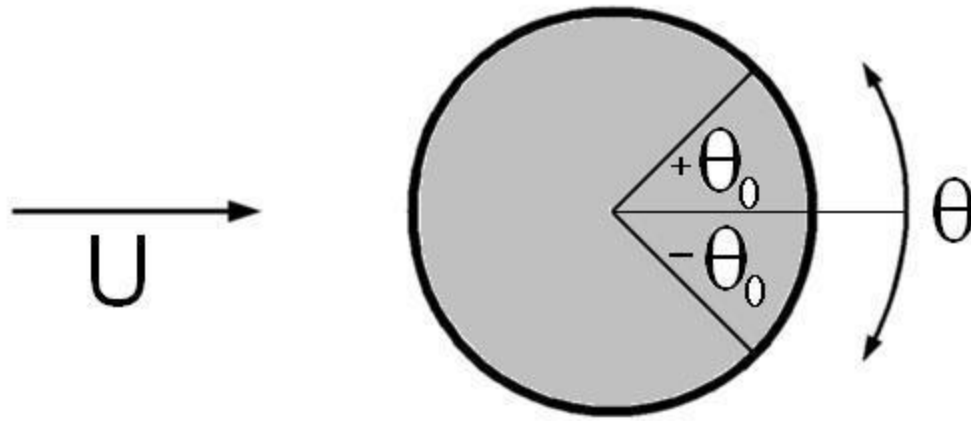
Расчет методом
ВВД

$$\frac{dp}{dx}$$

Vortex Cell,
Trapped vortex



Эффект Танеды



$$Re = \frac{U d}{v}$$

$$S = \frac{f d}{U}$$

$$V = \frac{\dot{\theta} d}{2U}$$

ВНЖ $\theta = -\theta_0 \cos(2\pi f t)$

$$V = A \sin(2\pi f t)$$

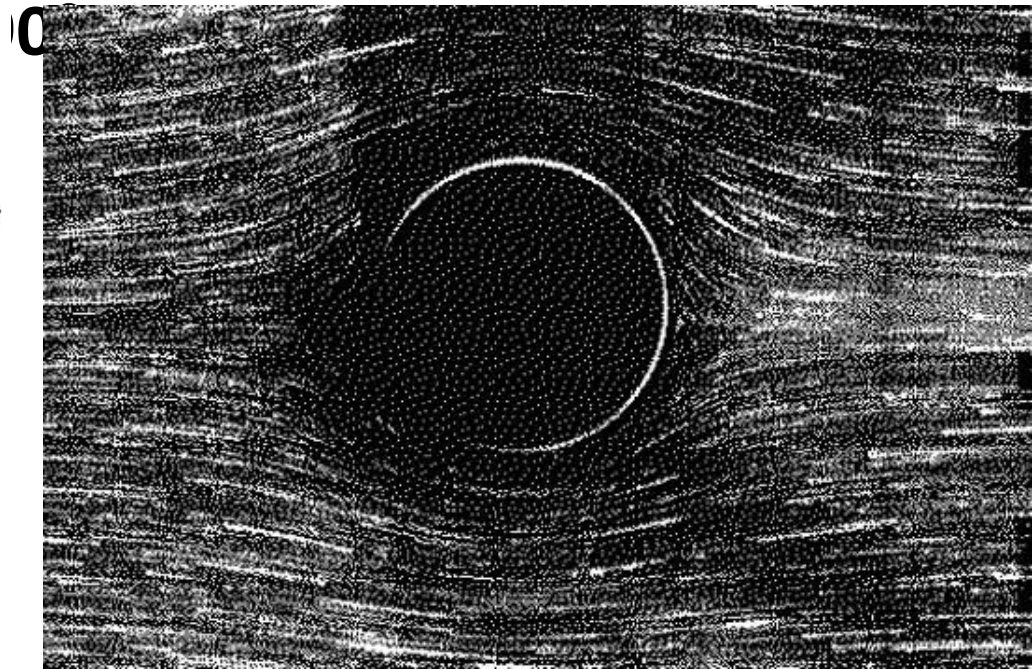
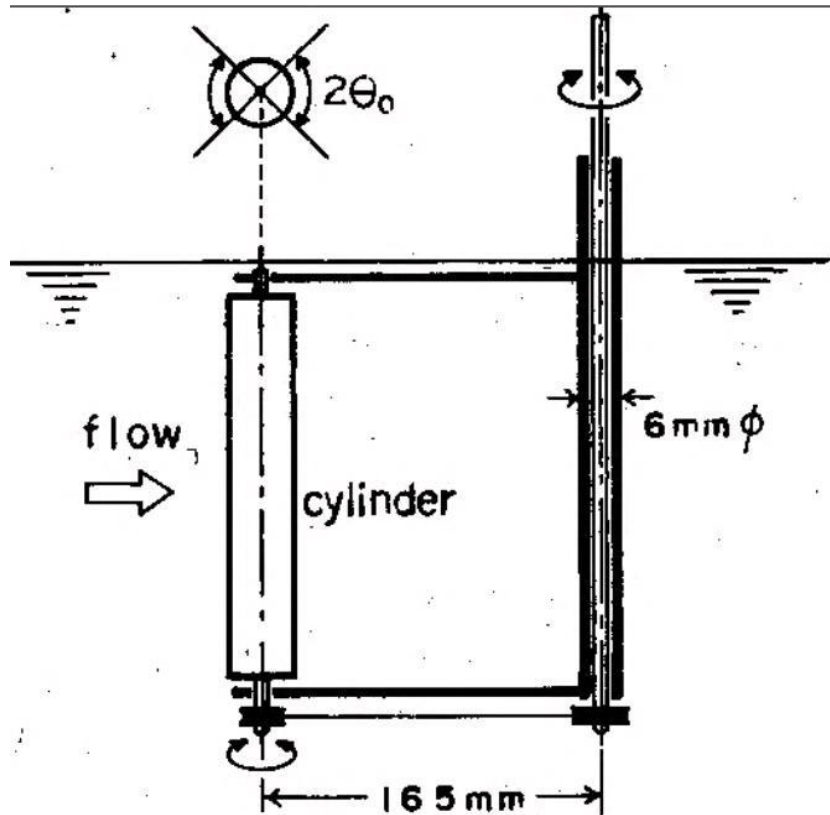
$$n = f/f_0$$

$$Re, S, \theta_0, A$$

$$A - \pi S \theta_0 = 0$$

Эксперименты Танеды 1978 (J.Ph.S.Jap)

Диапазон параметров: скорость от 0.1 до 10 см/с,
диаметр от 1 см. до 3.2 см.



$$Re=40, S=23, \quad \theta_0 = 45^\circ$$

Taneda's experiment (1978)

Wu*(1996):

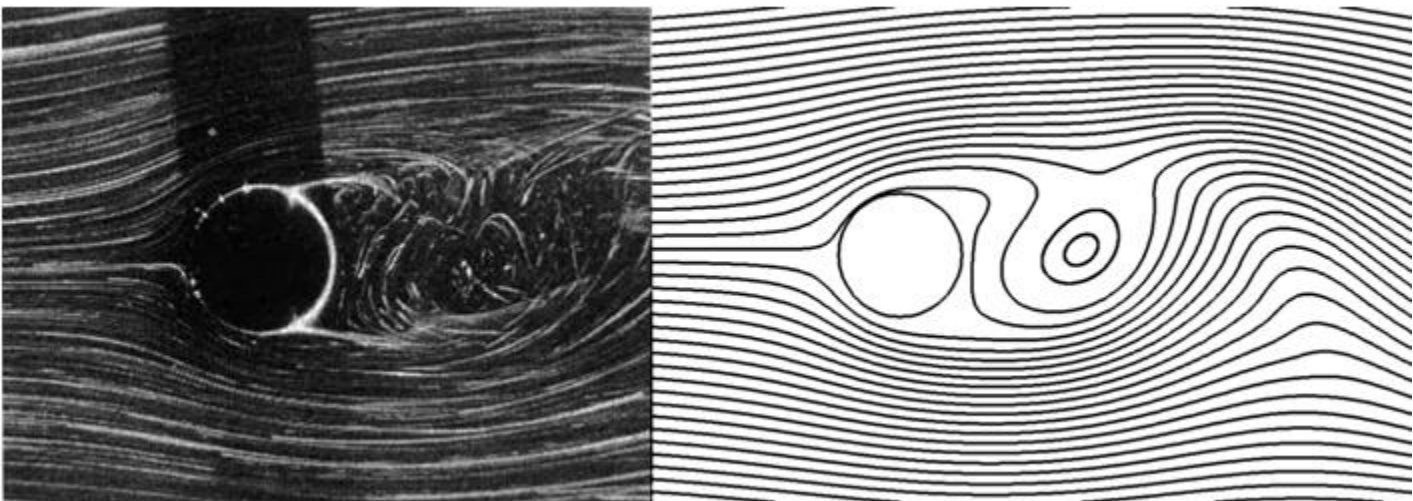
So far Taneda's experiment has never been reproduced numerically for some unknown reason

*) J.Z. Wu, J.V.Wu. Vorticity Dynamics on Doundaries. //Advances in Applied Mechanics, vol 32, ed by J. W. Hutchinson, T.Y.Wu. 1996

Воспроизведено в :

Гувернюк, Дынникова, Дынников, Малахова: **ДАН, 2010**

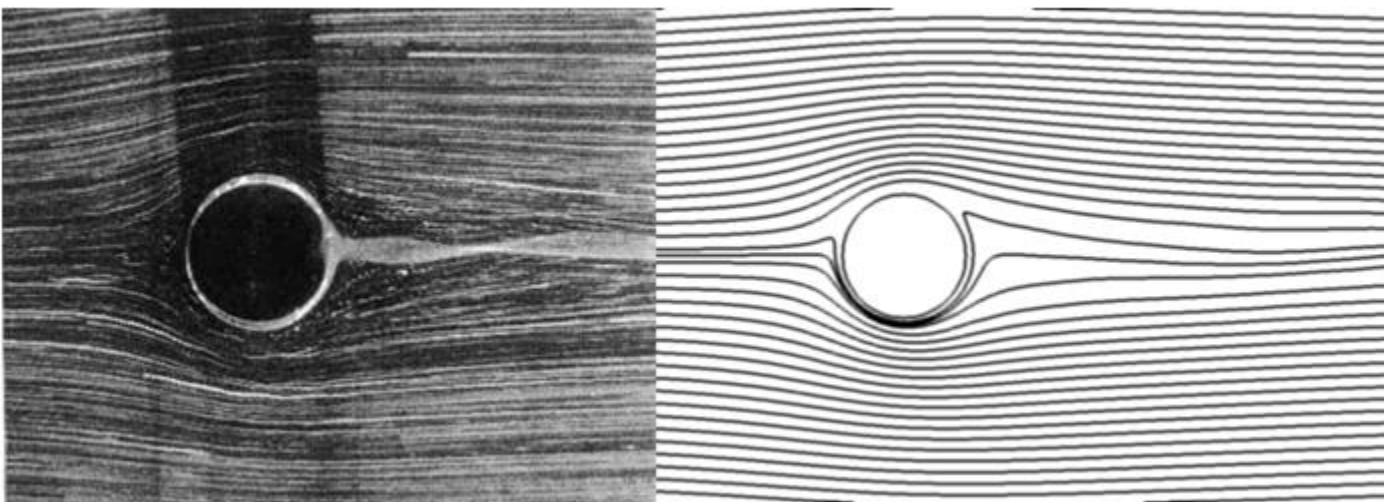
Расчеты методом ВВД воспроизводят экспериментальный эффект



Неподвижный цилиндр $Re = 111$ $n = 0$

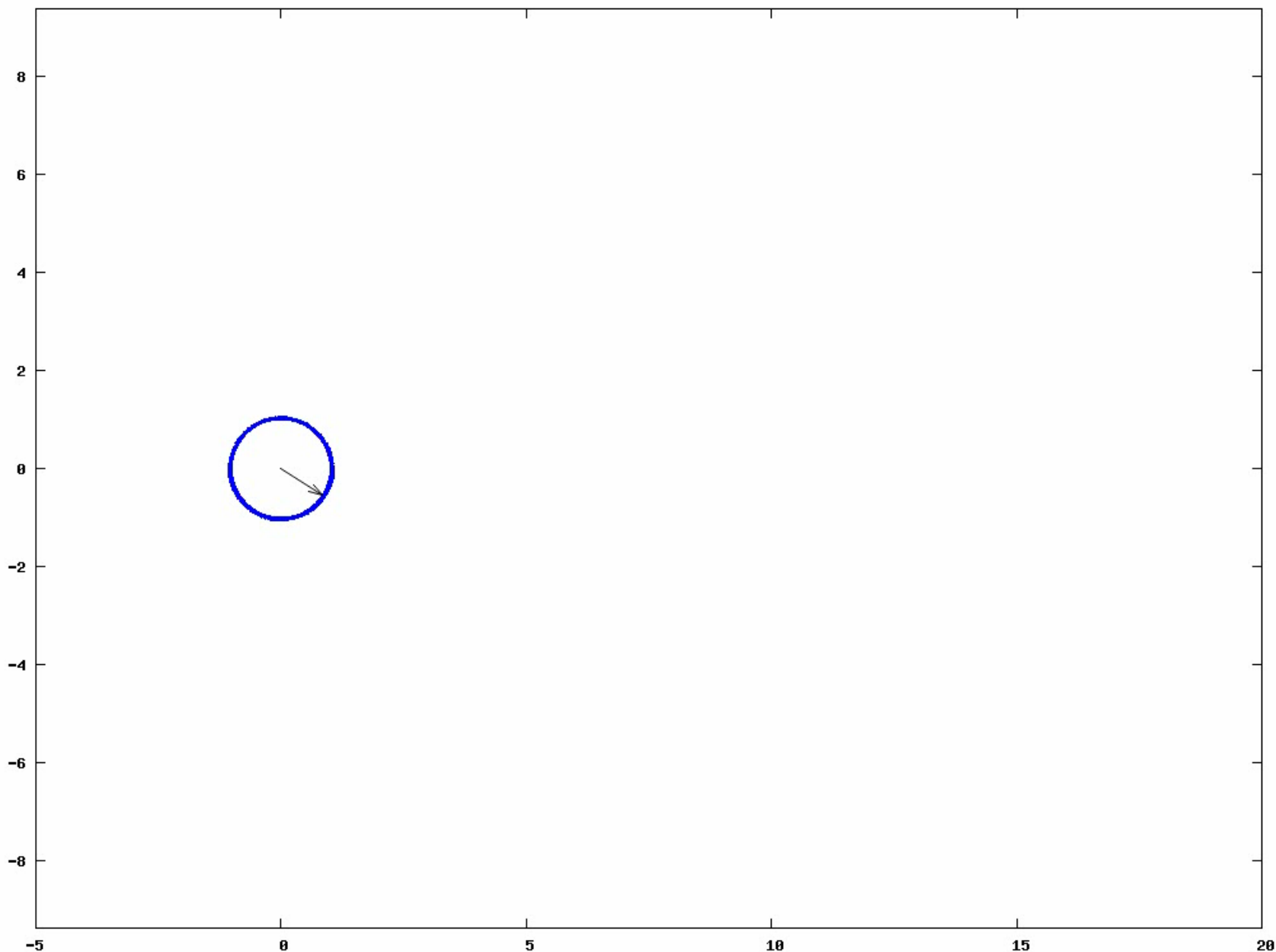
$$n = f/f_0$$

$$S = fd/U$$



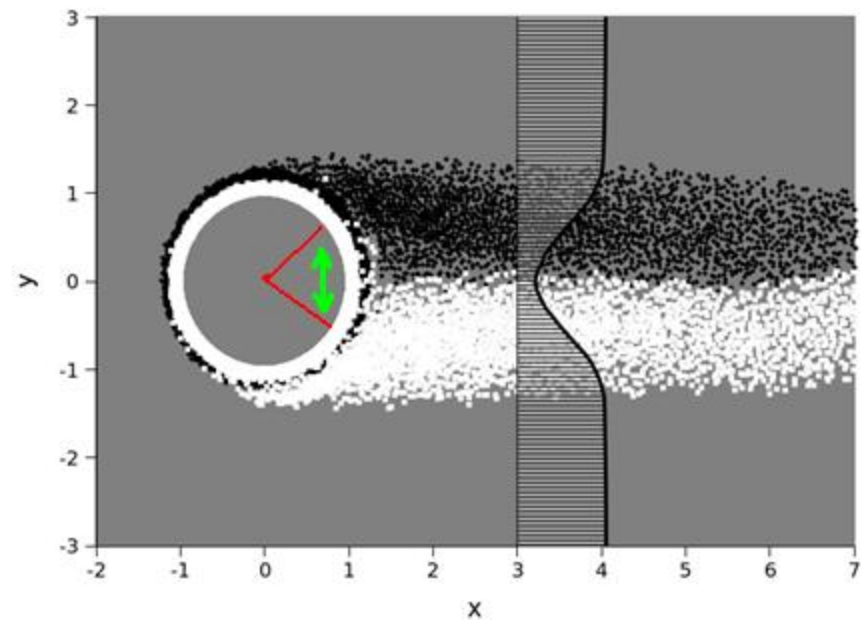
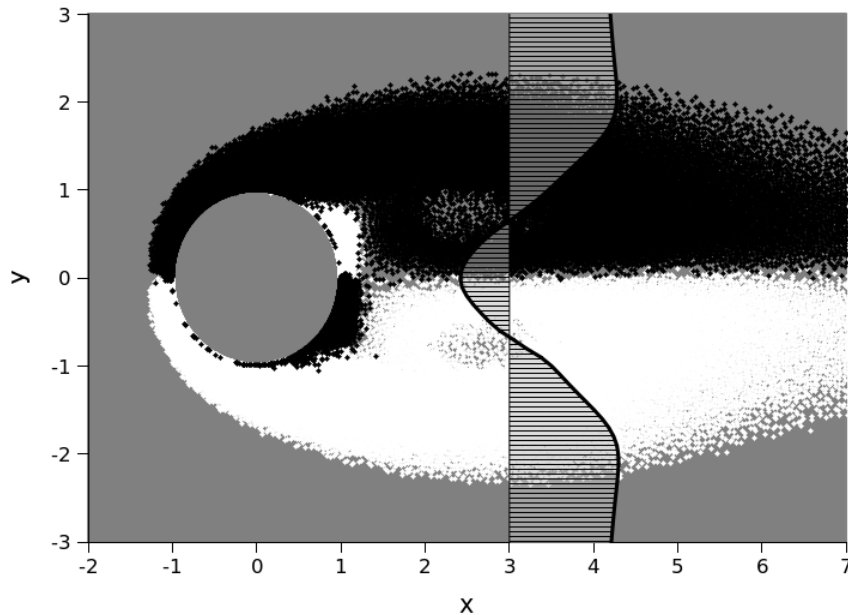
Колеблющийся цилиндр $Re = 111$ $S = 3.4$ ($n = 20$)

Анимация: колебания \rightarrow останов \rightarrow возобновление колебаний
 $n = 20$ ($S=3.4$) $n=0=S$ $n = 20$ ($S=3.4$)



**Профили скорости за неподвижным и колеблющимся
цилиндрами в начальный период формирования следа после
мгновенного старта**

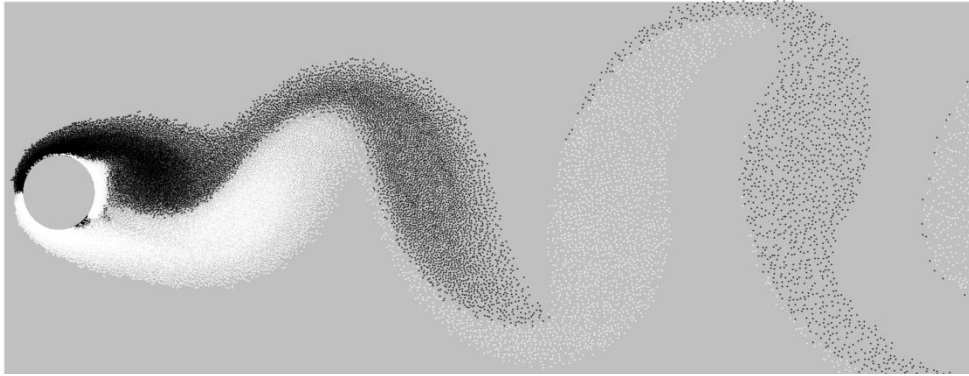
$t = 12 R/V$



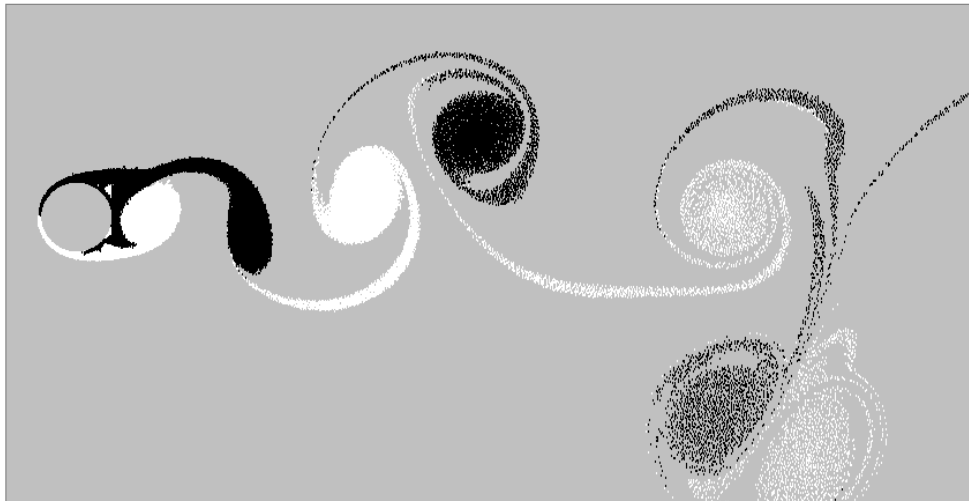
Re=111

n = 20

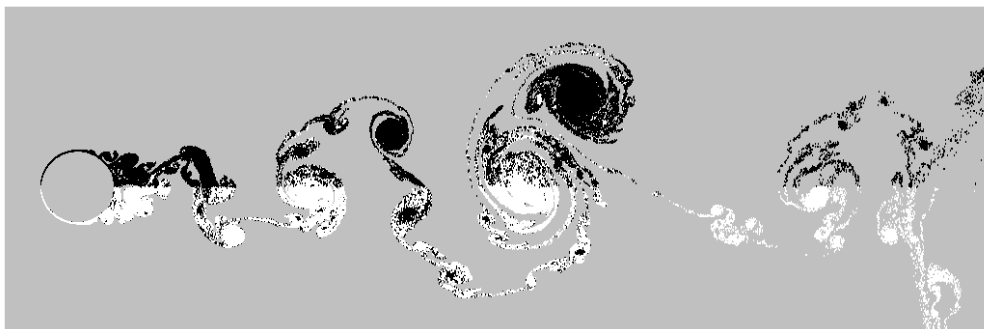
Вихревой след за цилиндром при различных значениях Re



$Re = 100$



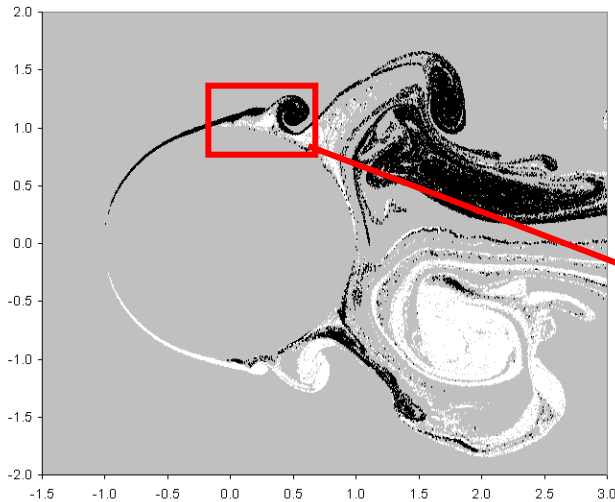
$Re = 10^3$



$Re = 7 \cdot 10^5$

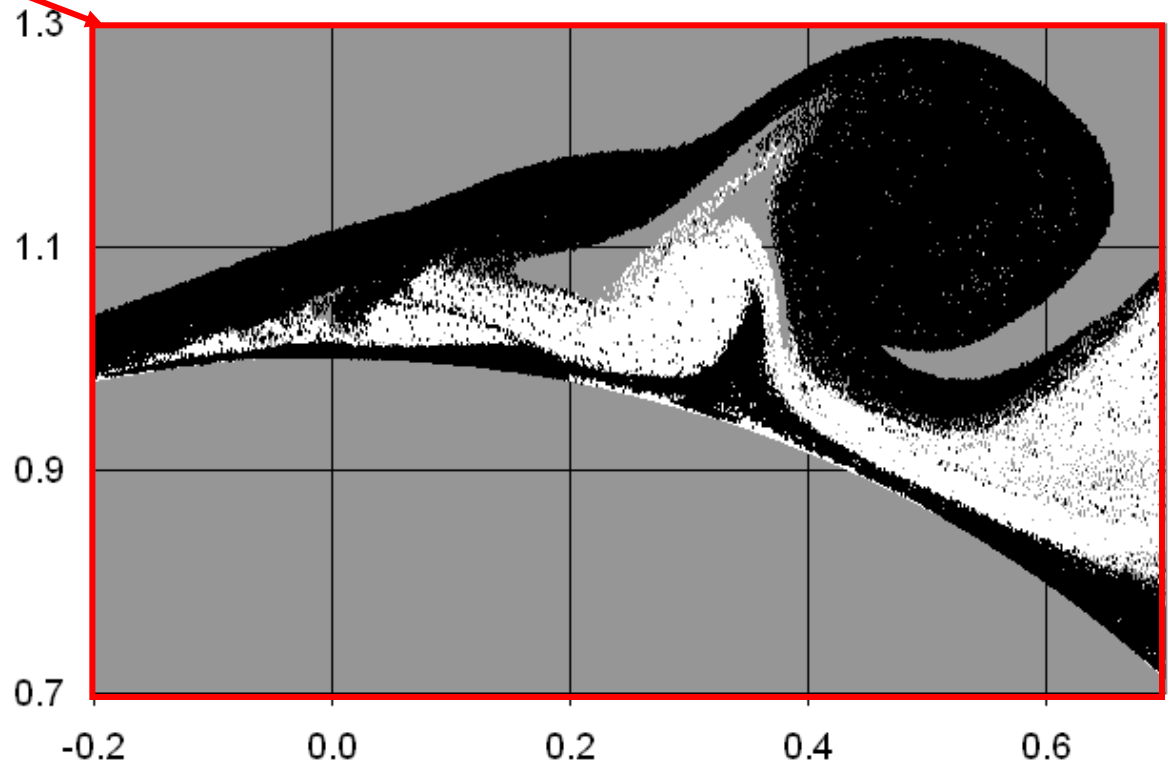
Высокое разрешение структуры пограничного слоя

$Re=2 \cdot 10^4$

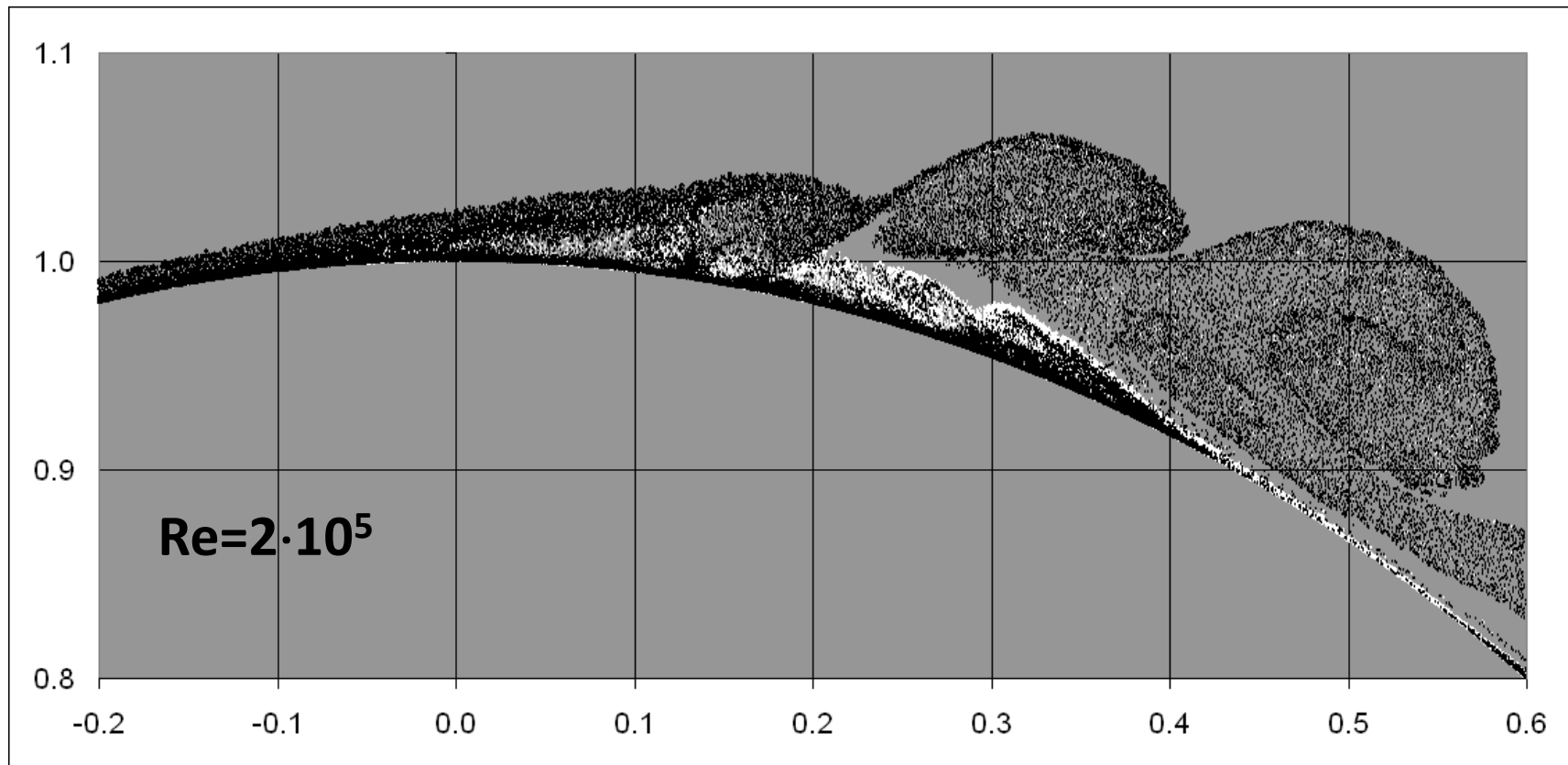


Числовая плотность
точек вблизи
поверхности $\sim 10^9 / R^2$

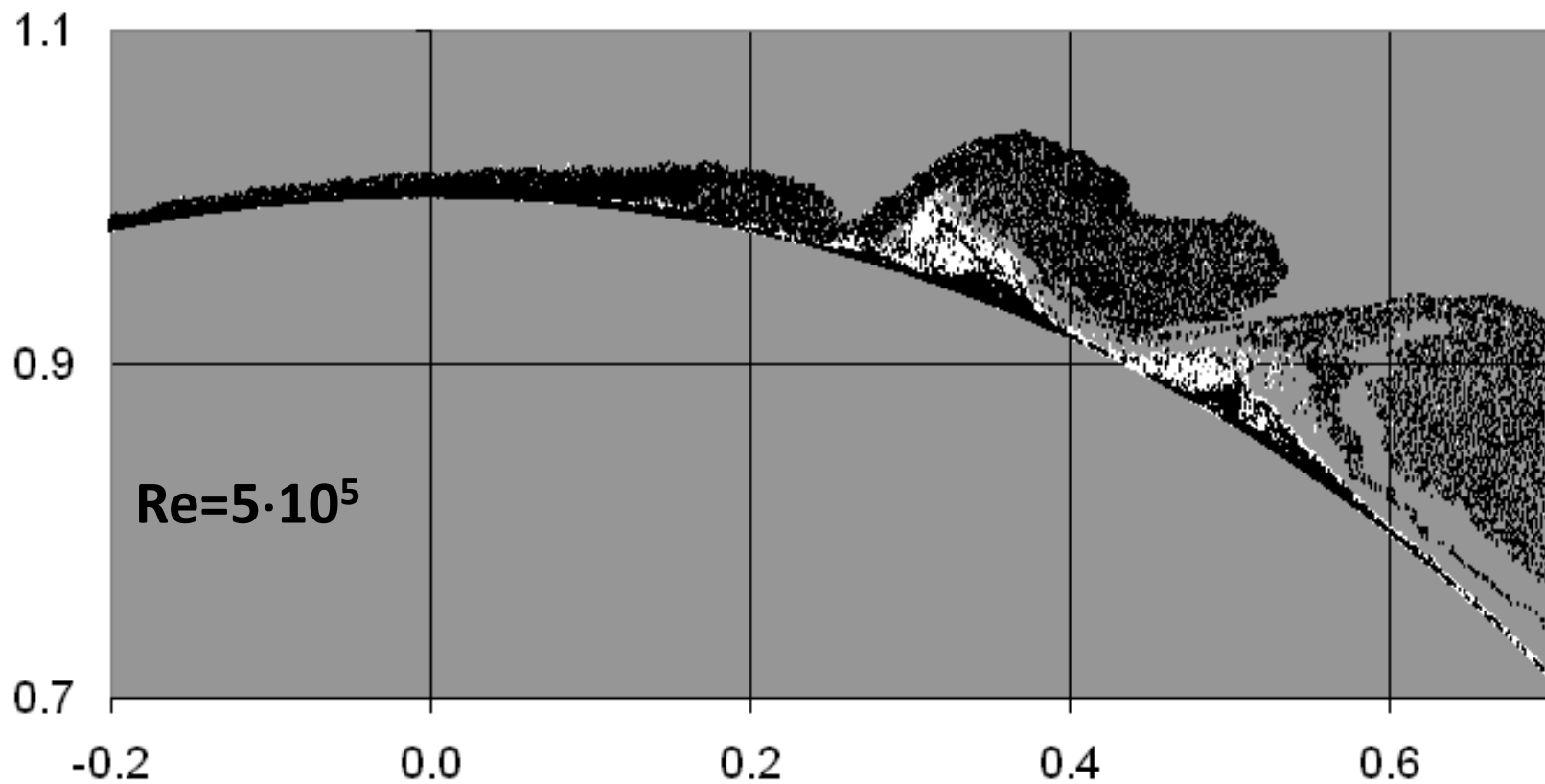
На этом фрагменте более чем 10^5
контрольных точек



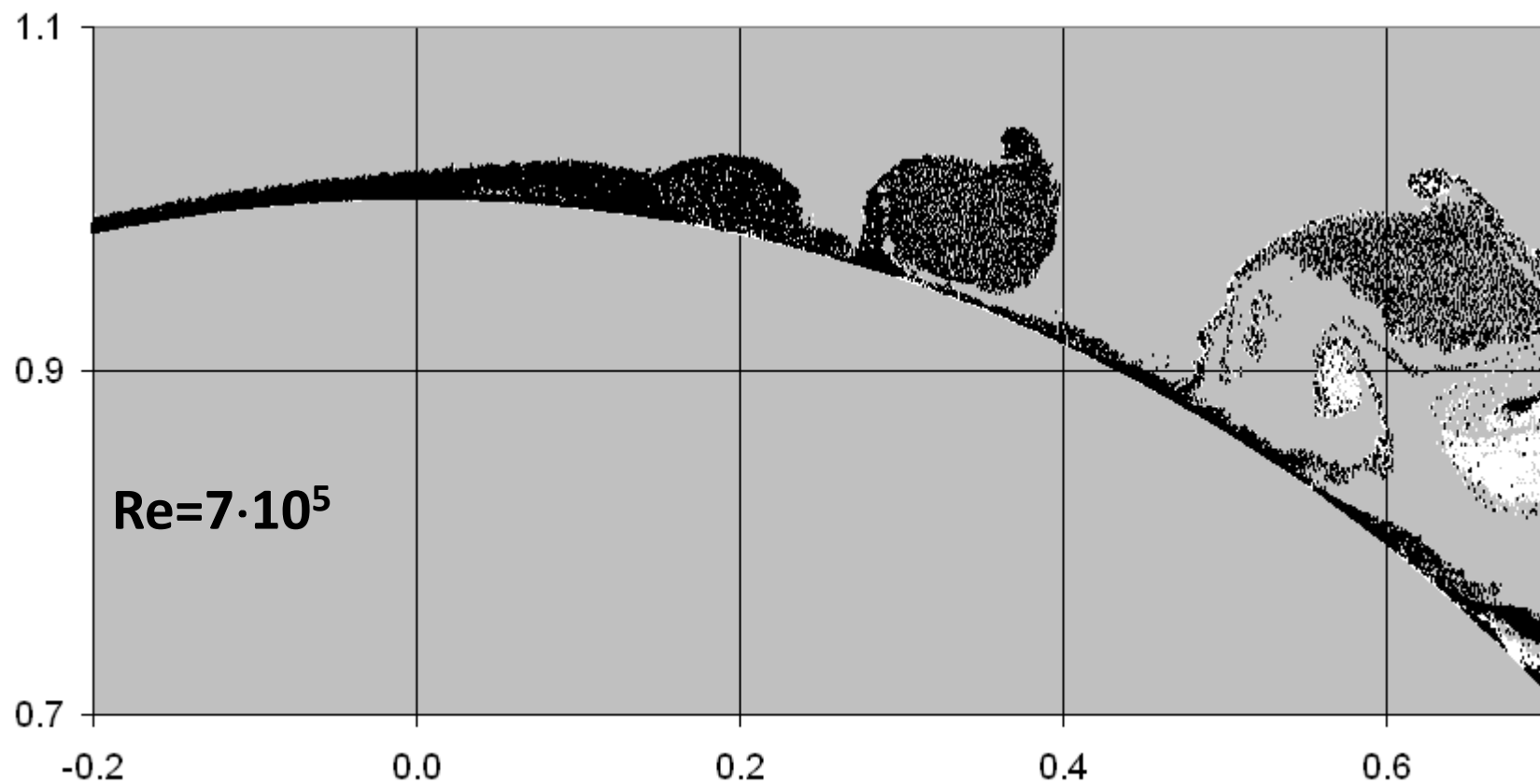
Фрагмент пограничного слоя на поверхности цилиндра при
 $Re=2 \cdot 10^5$

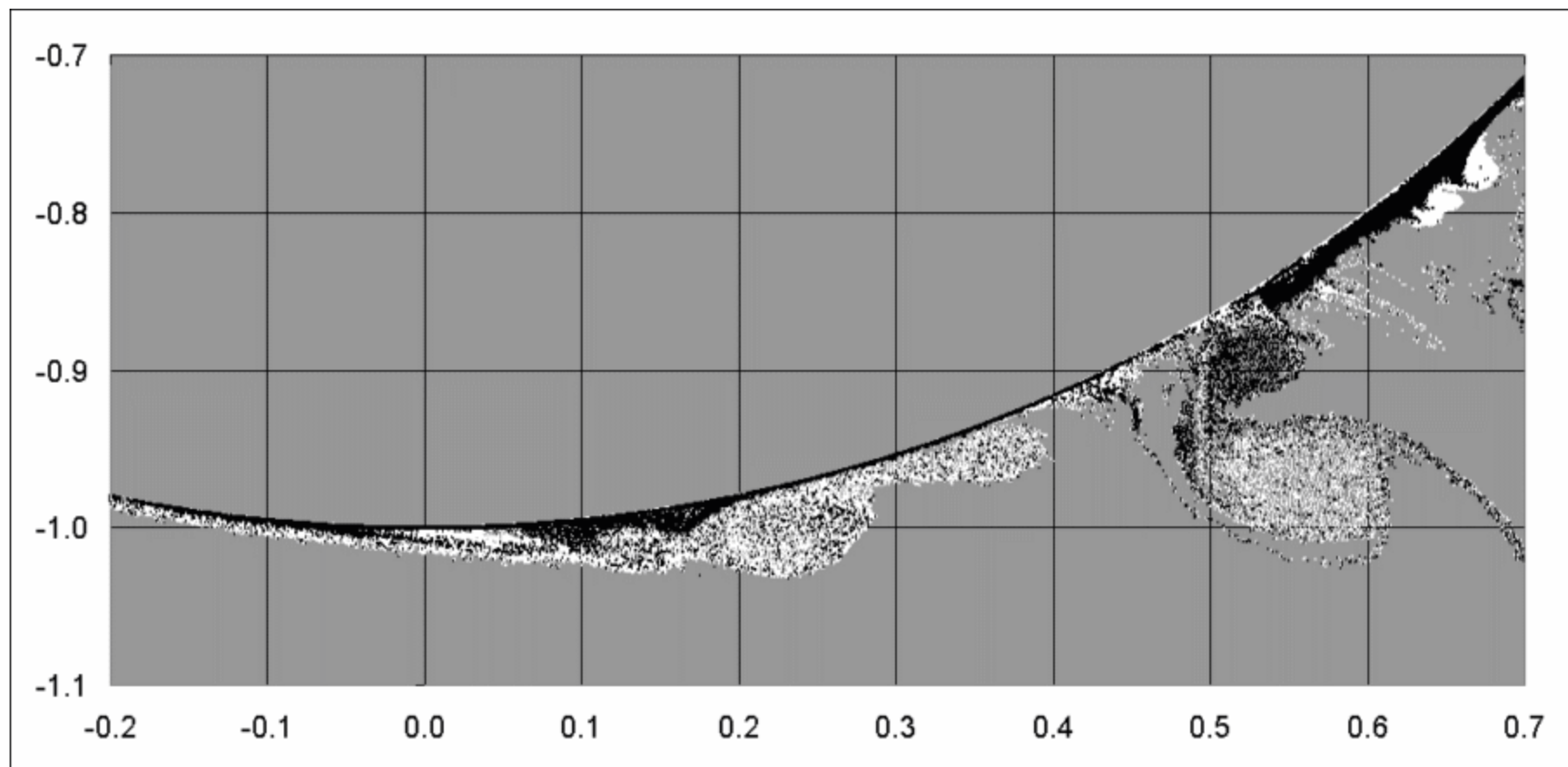


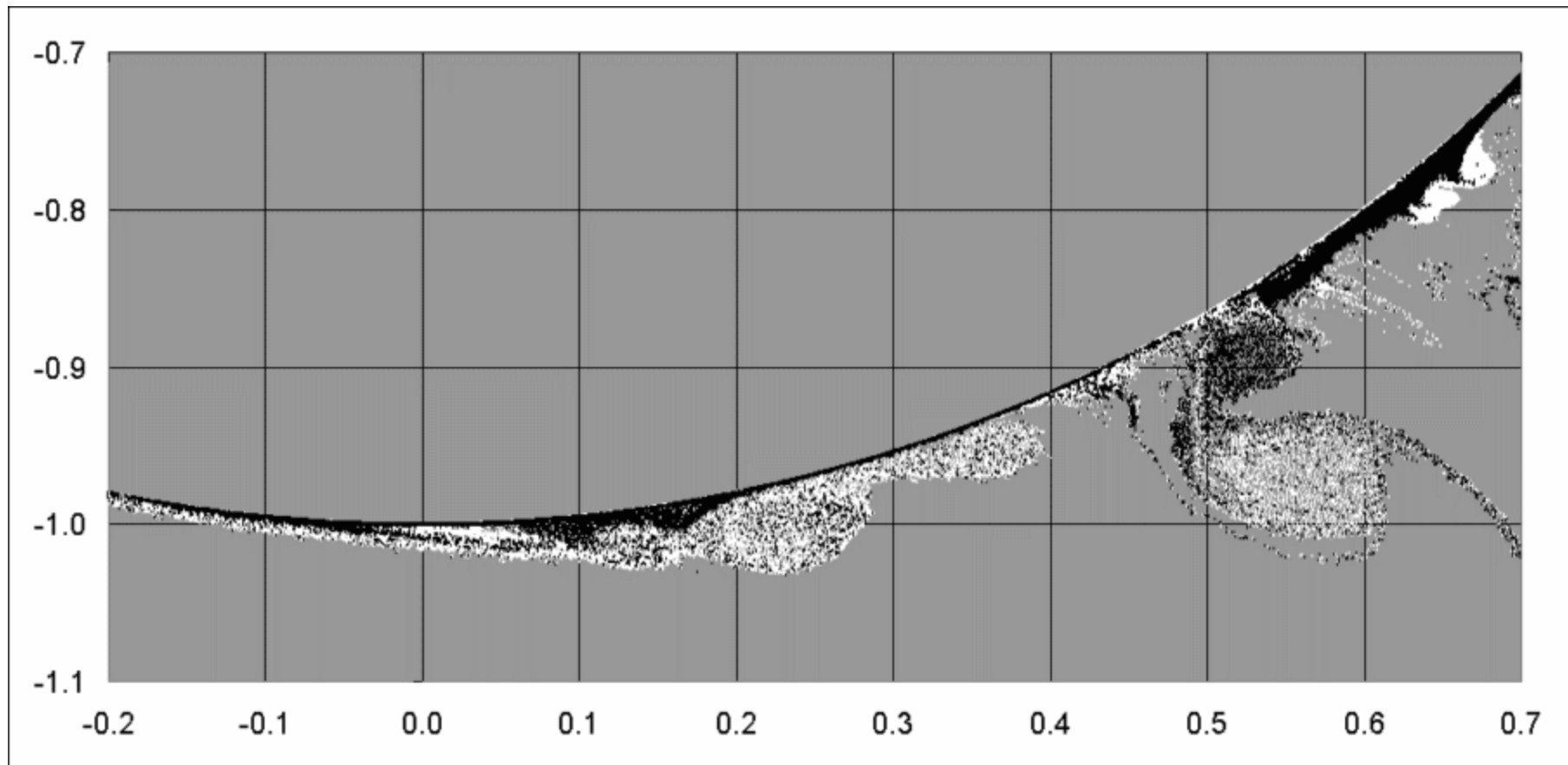
Фрагмент пограничного слоя на поверхности цилиндра при
 $Re=5 \cdot 10^5$



Фрагмент пограничного слоя на поверхности цилиндра при
 $Re=7 \cdot 10^5$





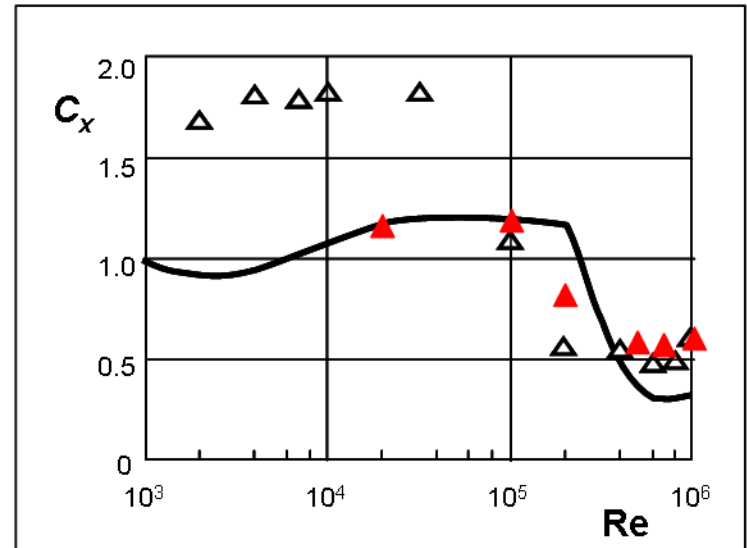


Воспроизведен кризис сопротивления

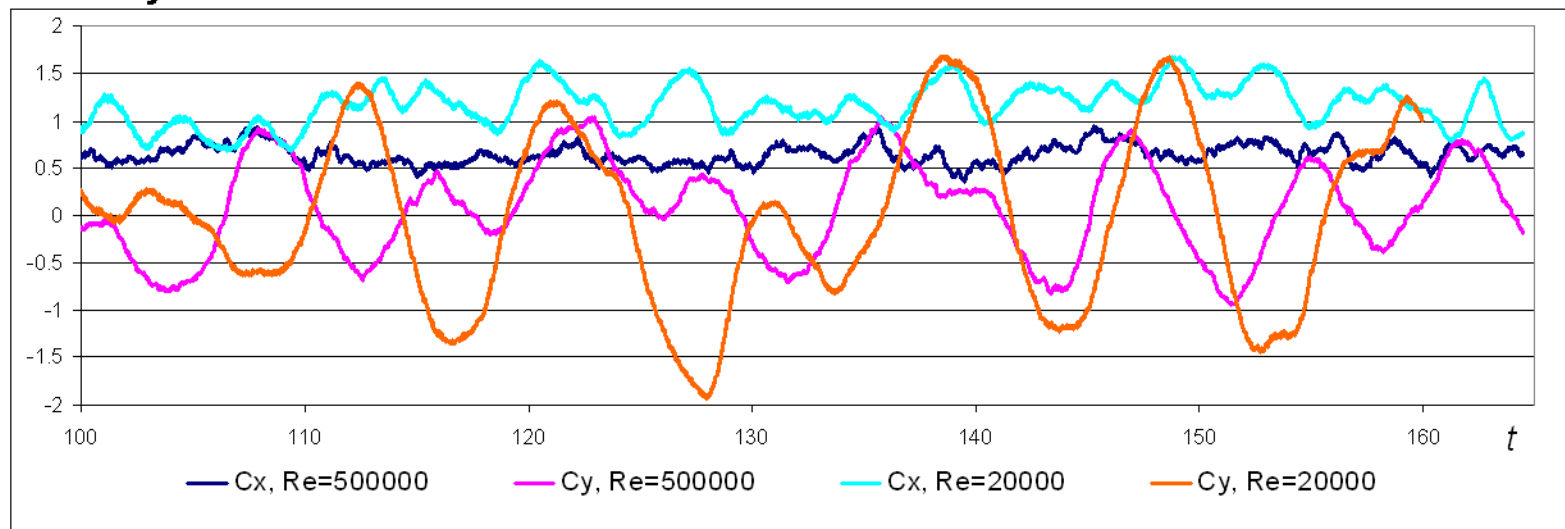
▲ VVD

△ S.P. Singh and S. Mittal, Flow Past a Cylinder: Shear Layer Instability and Drag Crisis. // International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2005. V. 47. P. 75-98

— Wieselsberger C. Neuere feststellungen
uber die gesetze des flussigkeits-und
luftwiderstands. // Rhys. Z. 1921. V. 22. P. 321-
328



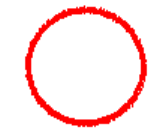
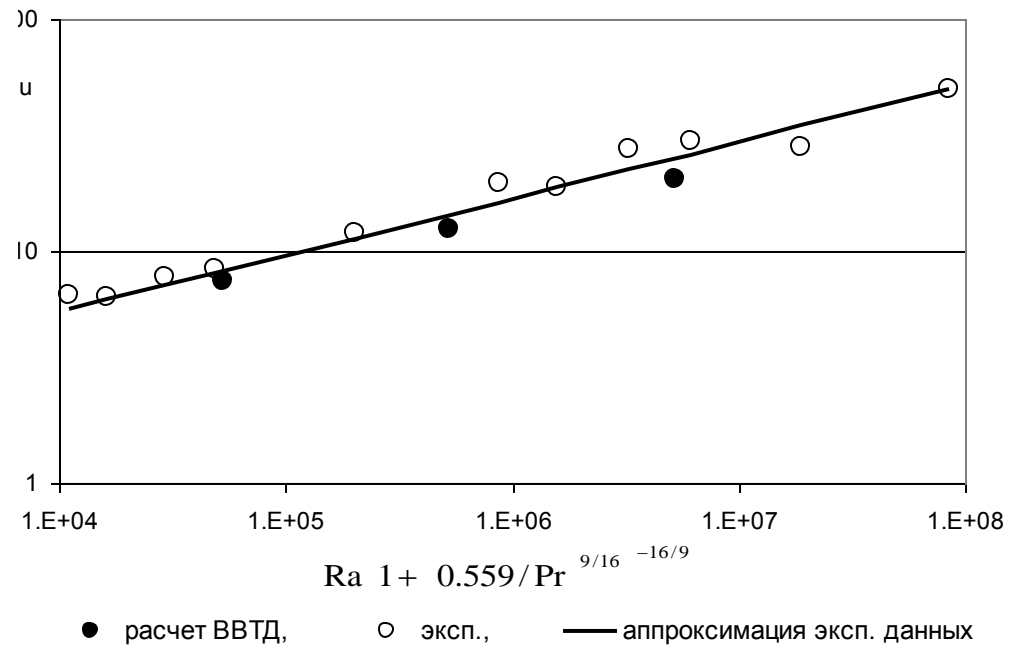
Time dependencies of drag (C_x) and lift (C_y) coefficients



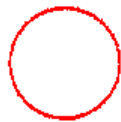
Моделирование свободной конвекции методом ВВТД

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = \mathbf{V} + \mathbf{V}_d \times \boldsymbol{\Omega} - \text{Gr} \bar{T} \mathbf{e}_g - \nabla \left(p + \frac{V^2}{2} \right) - \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{V}$$

$$\Gamma_i = -\text{Gr} \Theta_i \Delta t \frac{\nabla T}{T} \times \mathbf{e}_g$$



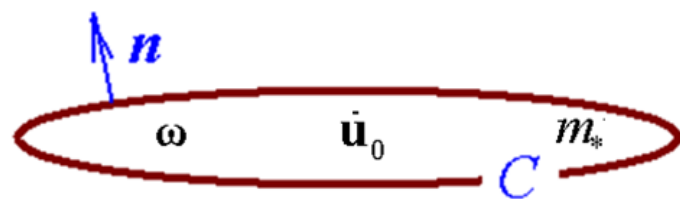
$\text{Gr} = 2.32 \cdot 10^5$



$2.32 \cdot 10^7$

$\text{Pr} = 0.7$

Постановка 2D сопряженной задачи



$$\mathbf{F} = -\oint_C P \mathbf{n} dl = F_x \mathbf{e}_x + F_y \mathbf{e}_y$$

$$P = 2 \rho \nu W - p E \quad \mathbf{M} = \oint_C \mathbf{r} \times (-P \mathbf{n}) dl = M_z \mathbf{e}_z$$

$$\mathbf{V}|_C = \mathbf{u} \quad \left. \frac{D\mathbf{V}}{Dt} \right|_C = \dot{\mathbf{u}} \quad J = \nu \frac{\partial \Omega}{\partial n}$$

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{e}_z \rho}{2} \oint_C r^2 J dl - \nu \rho \mathbf{e}_z \oint_C \Omega \mathbf{r} n dl + 2 I_* \dot{\boldsymbol{\omega}} - m_* \dot{\mathbf{u}}_0 \times \mathbf{r}_* - 4 \nu m_* \boldsymbol{\omega}$$

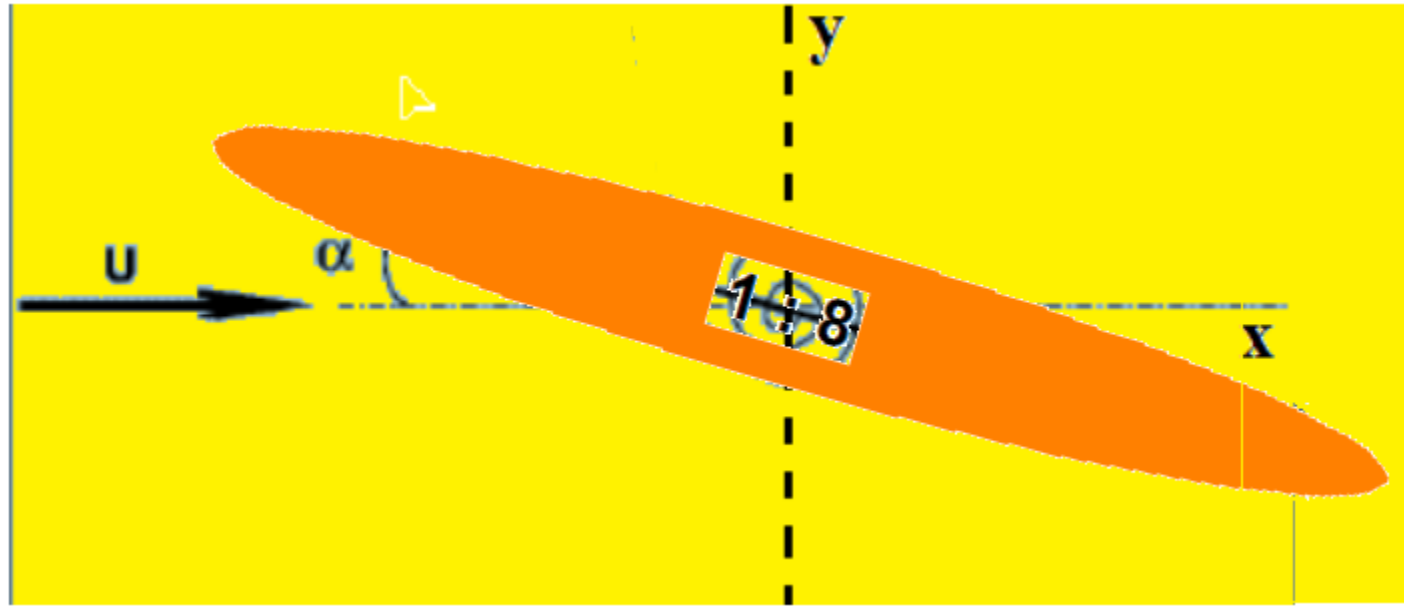
$$\mathbf{F} = m_* \dot{\mathbf{u}}_0 - \omega^2 m_* \mathbf{r}_* + 3 \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}_* + \rho \nu \oint_C \left(\Omega \mathbf{e}_l - \frac{\partial \Omega}{\partial n} \mathbf{r} \times \mathbf{e}_z \right) dl$$

$$\oint_C J dl = -2 S \dot{\boldsymbol{\omega}}$$

Автоколебания эллиптического профиля в упругом подвесе

$$K = m * p^2$$

$$R = J * q^2$$

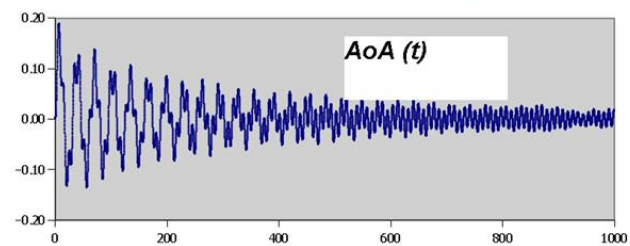
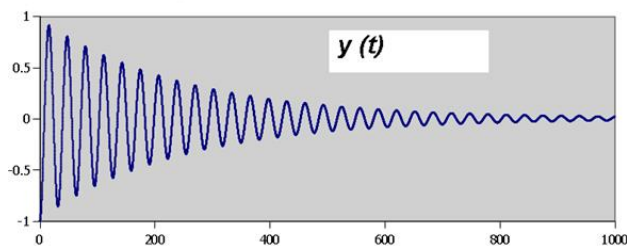


$$m y''[t] + K y[t] = F_y(y, \alpha, \dots)$$

$$J \alpha''[t] + R \alpha[t] = M_Z(y, \alpha, \dots)$$

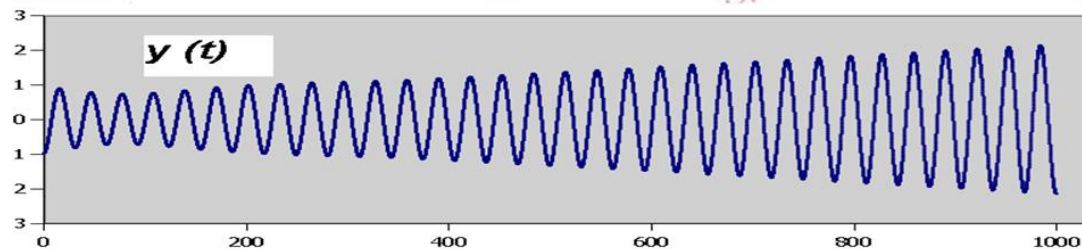
Затухание колебаний v1_02_07

$t = 366.8$

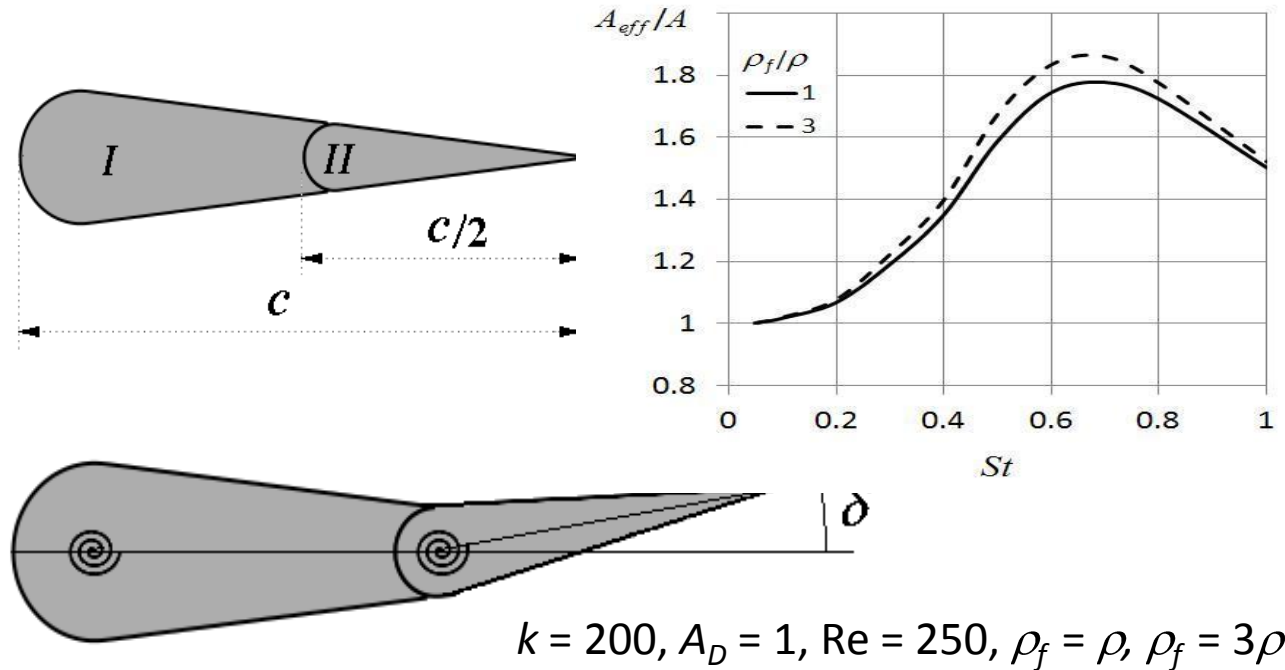
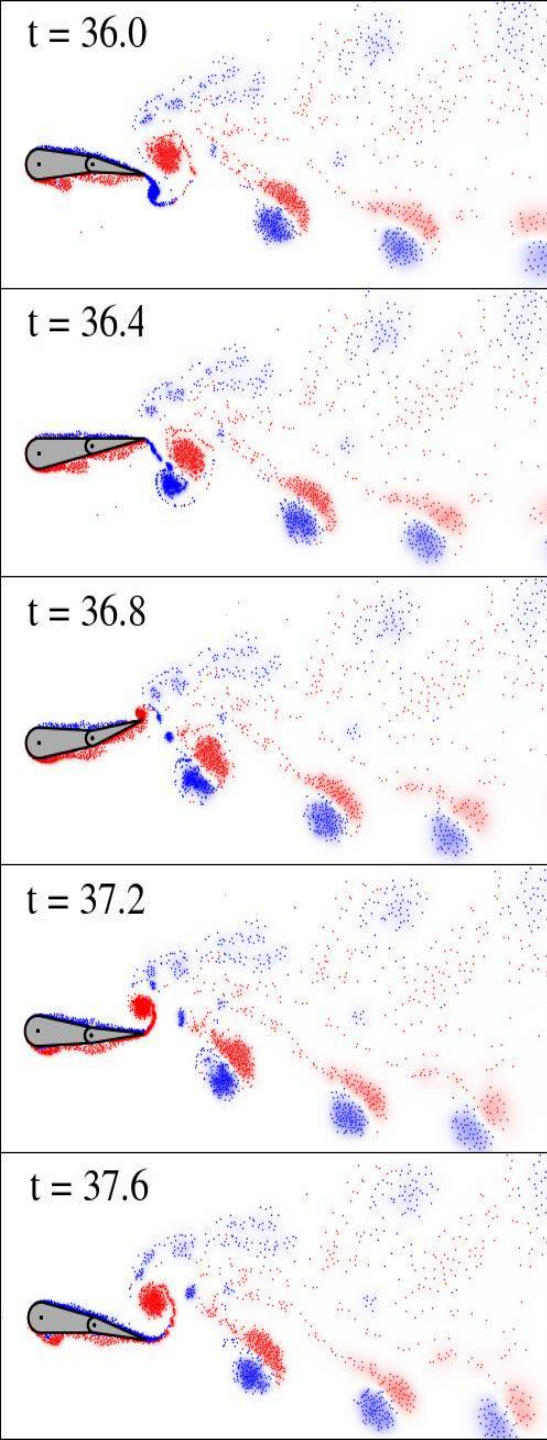


Флаттер v1_02_02

$t = 359.2$



Колебания гибкого профиля



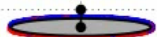
$$\delta = \varphi_I - \varphi_{II} \quad \mathbf{r}_c, \mathbf{r}_m = \mathbf{F}(\varphi_I, \varphi_{II})$$

$$\varphi_I = \theta \sin(2\pi ft)$$

$$J_{II} \ddot{\varphi}_{II} = k(\varphi_I - \varphi_{II}) + \frac{M_{H,II}}{\rho U^2 D^2} - \frac{(\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_c) \times \ddot{\mathbf{r}}_c}{U^2 D^2} \mathbf{e}_z S_{II}$$

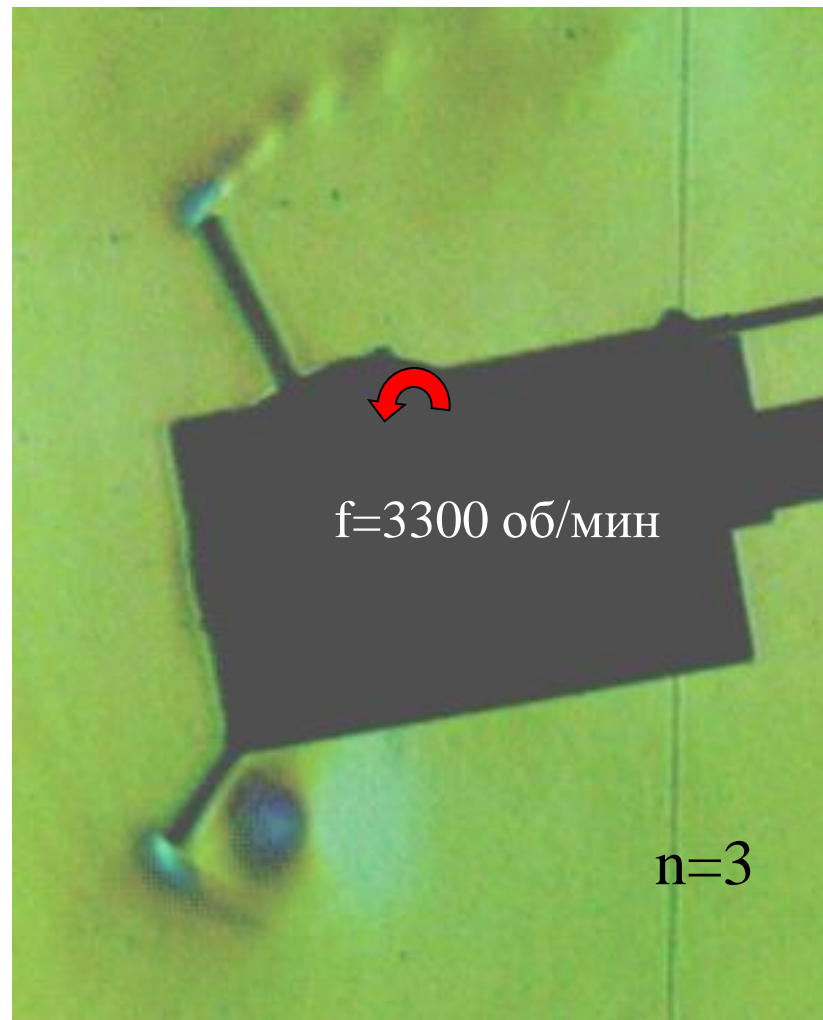
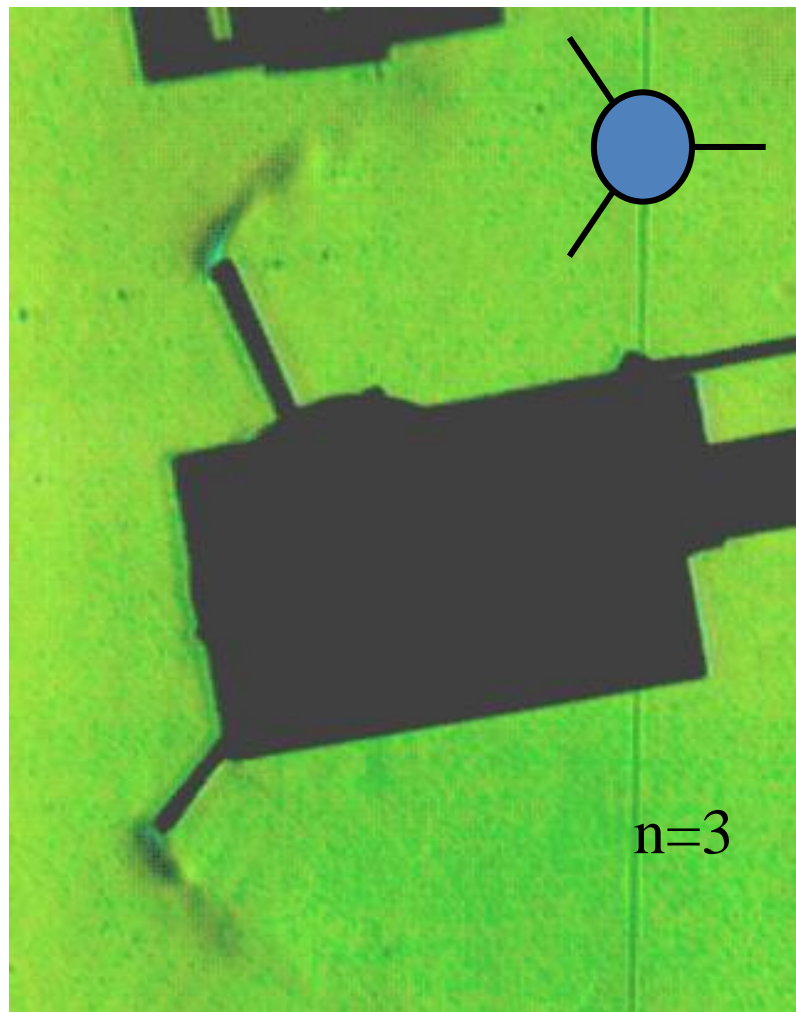
Катастрофические автоколебания

$t = 0.400000$



v1_02_0075

Эксперимент : вихревой «спутник» при авторотации оперенного цилиндра

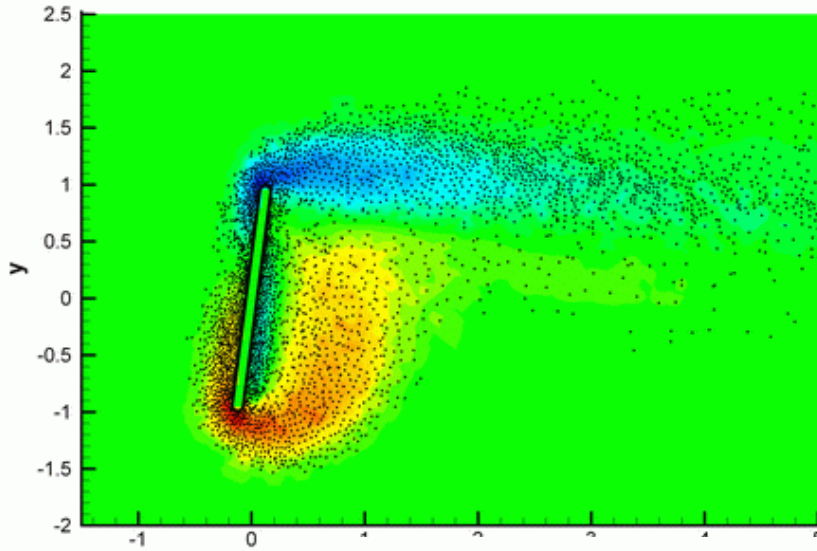


Скорость потока 30 метров, высота лопаток $h=0.58$

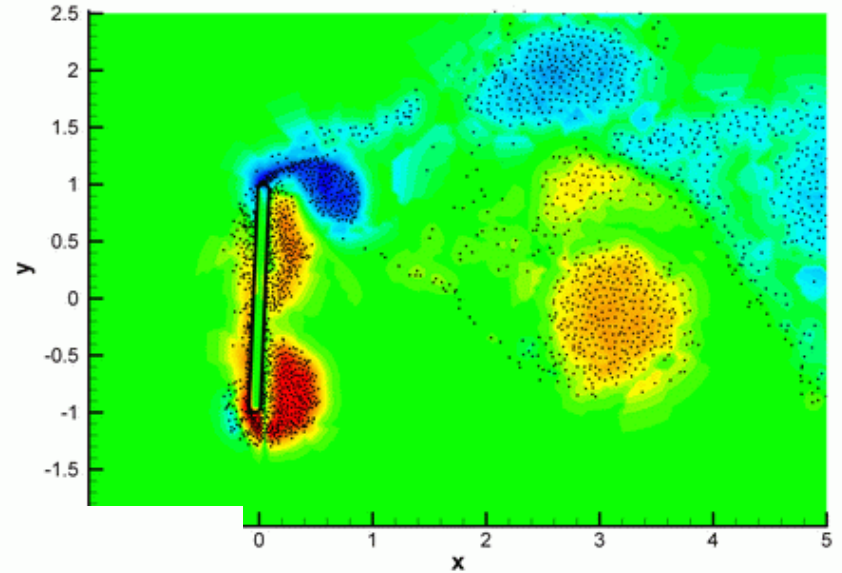
Слева – **нет вращения** ,

справа - **авторотация**

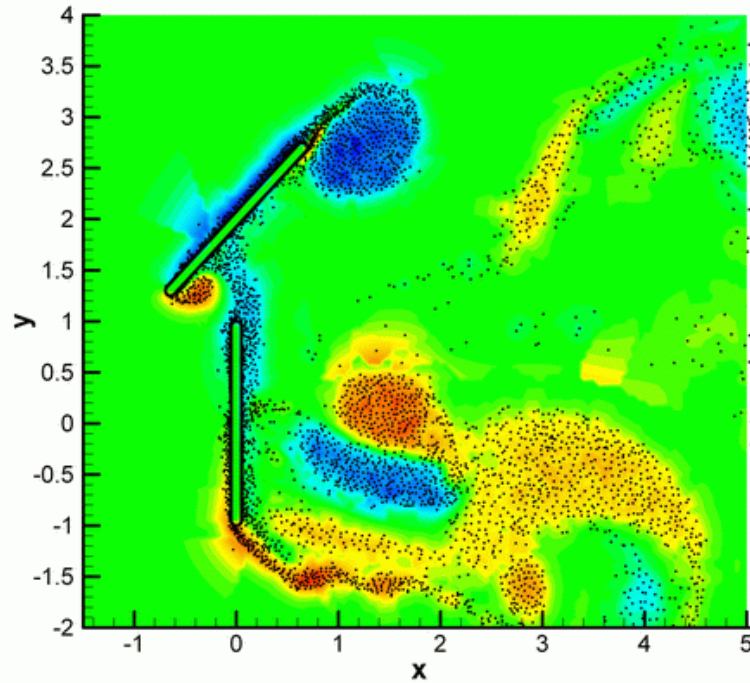
Авторотация пластины в потоке



$Re = 40$

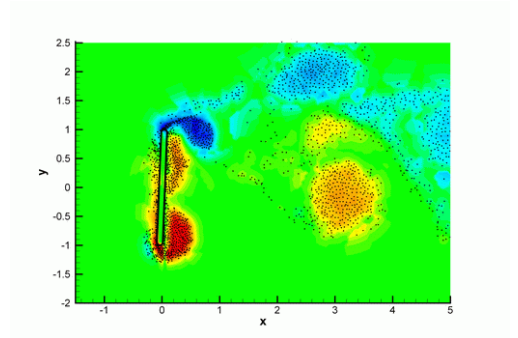
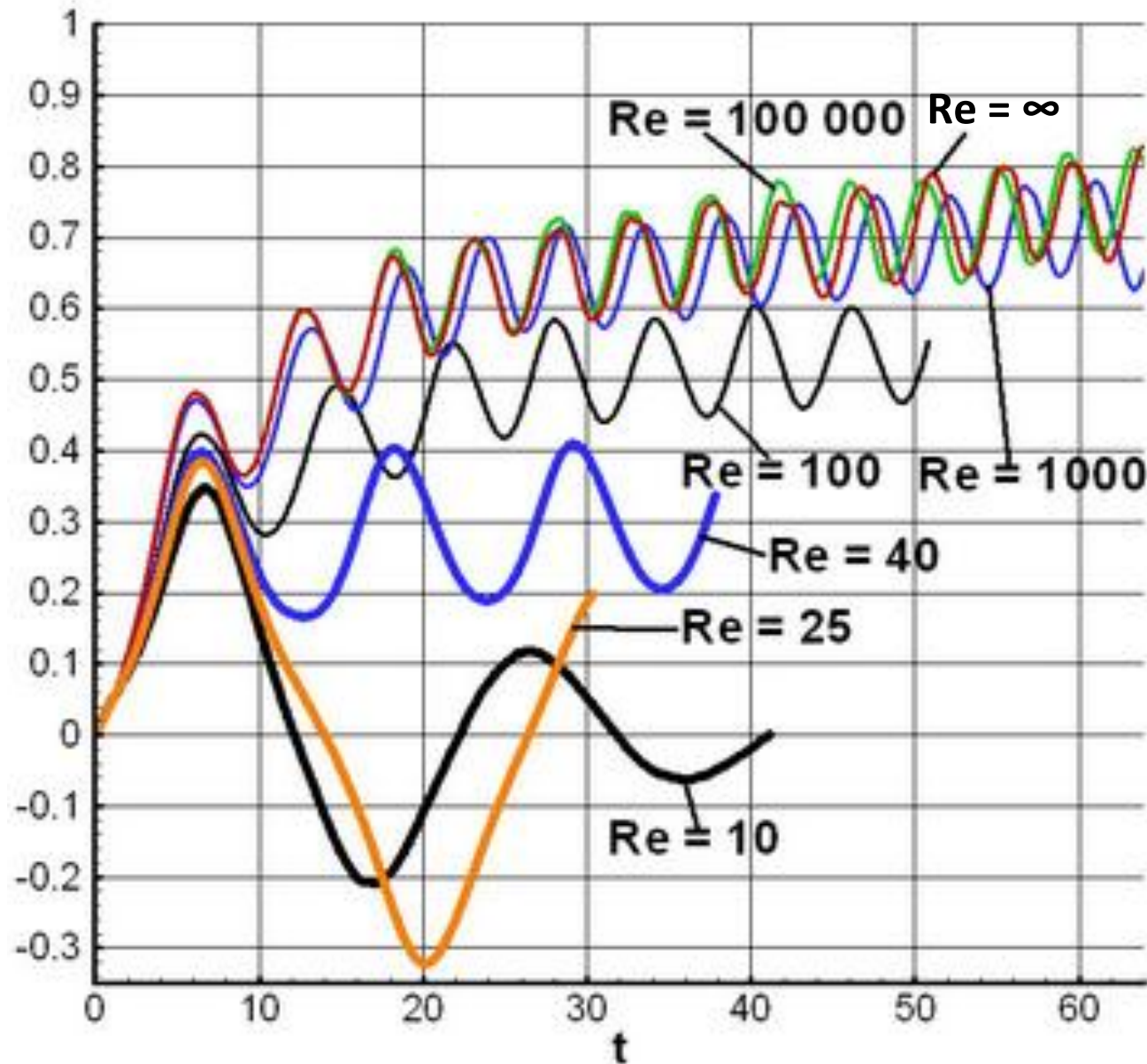


$Re = 1000$



$Re = 1000, J = 20,$

Зависимость угловой скорости пластины авторотации от времени при различных значениях числа Re .

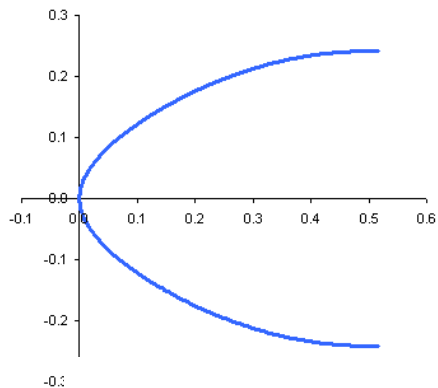


Безразмерный
момент инерции
 $J=20$;
начальное
отклонение $\alpha=10^\circ$

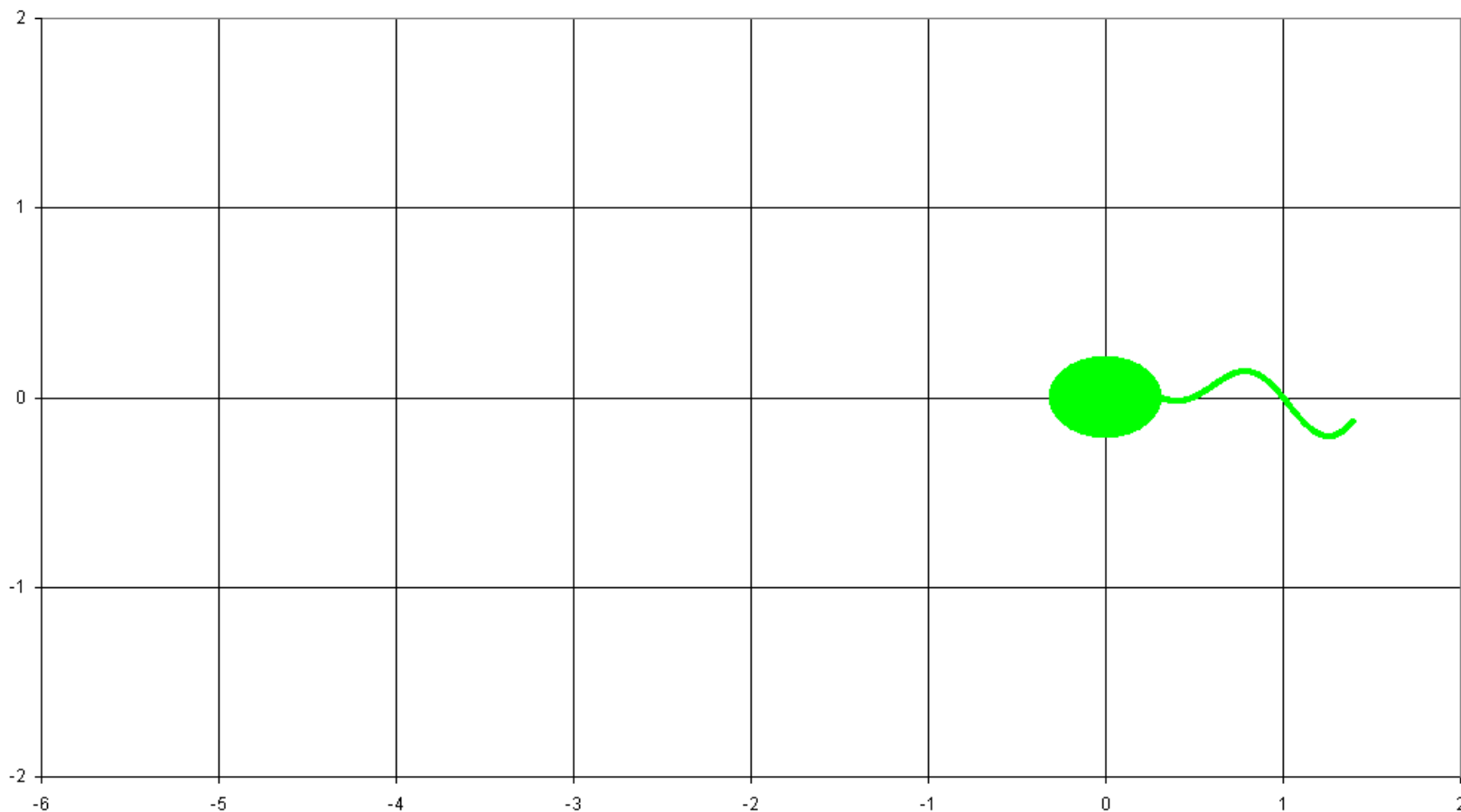
$Re = 40$ и выше
- авторотация

$Re = 25$ и ниже –
автоколебания

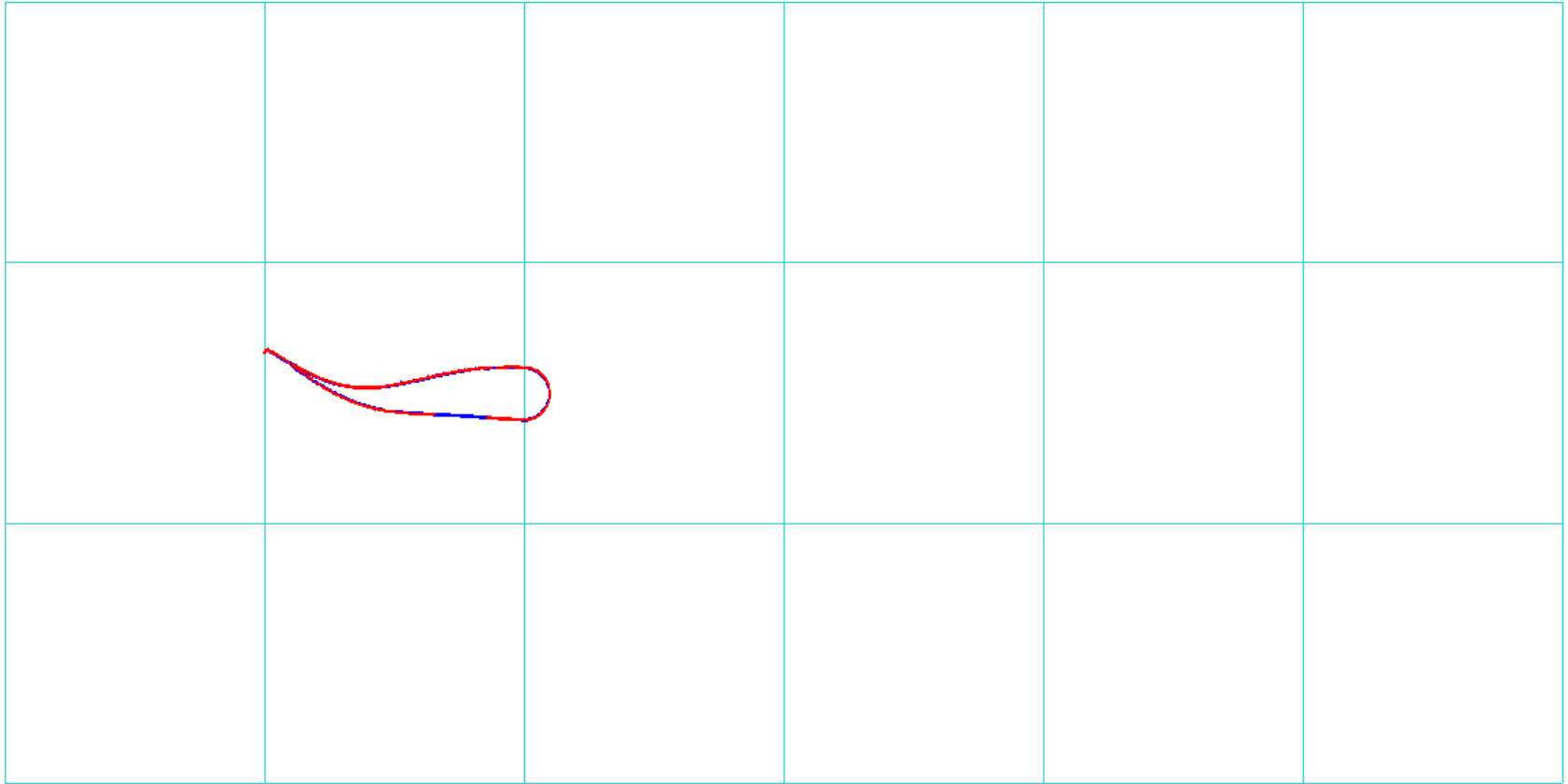
движение тел в жидкости за счет изменения их формы



Тело меняет форму по заданному
закону от времени в первоначально
неподвижной жидкости



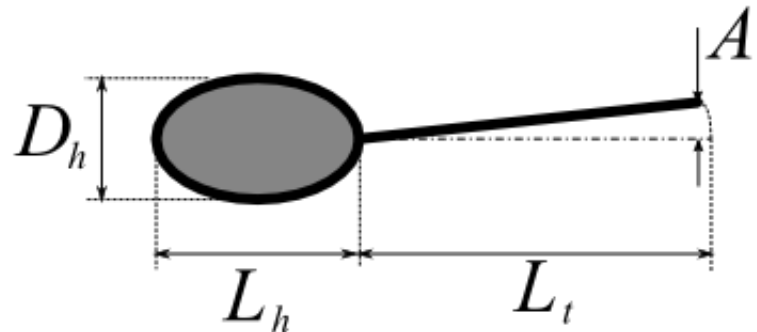
Самодвижение «рыбки» за счет деформирования поверхности



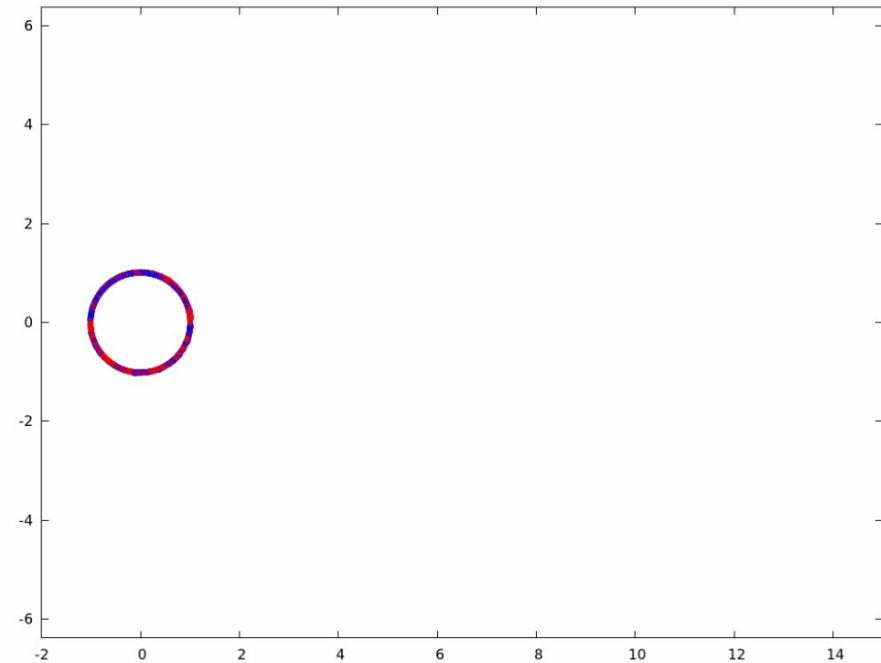
ВНЖ

Машущий твердый киль

$$\begin{aligned} L_h &= 1cm, \quad L_t = 2.25cm, \\ \nu &= 10^{-2} cm^2/s \text{ (water)}, \\ A &= 0.12cm, \quad \bar{f} = 4Hz \end{aligned}$$



Изменение вихревой системы за колеблющимся цилиндром

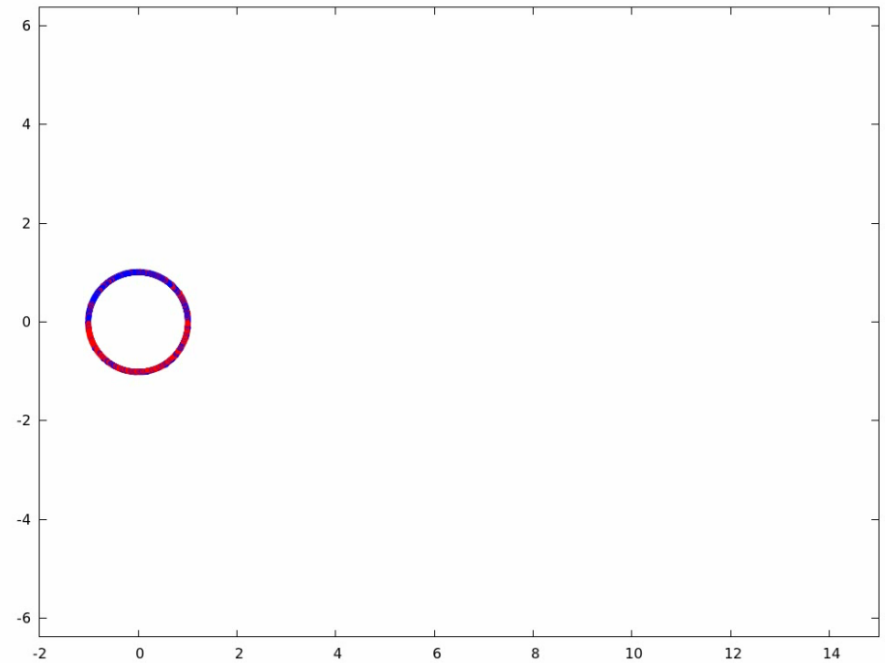


$Re=570$

$Pr=1$

$A=0.875$

$f/f_k=1.3$



$Re=570$

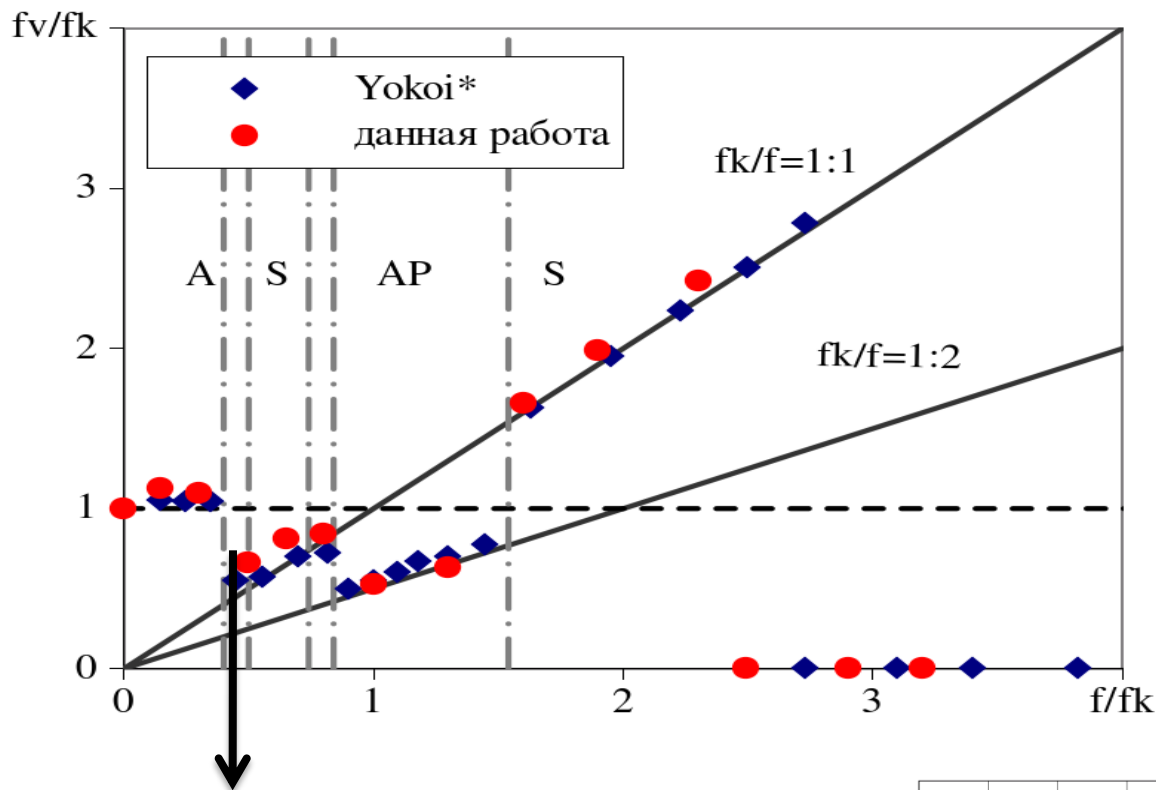
$Pr=1$

$A=0.875$

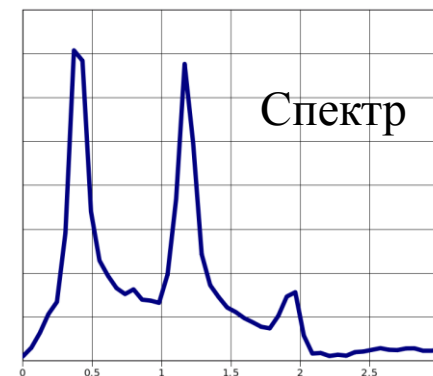
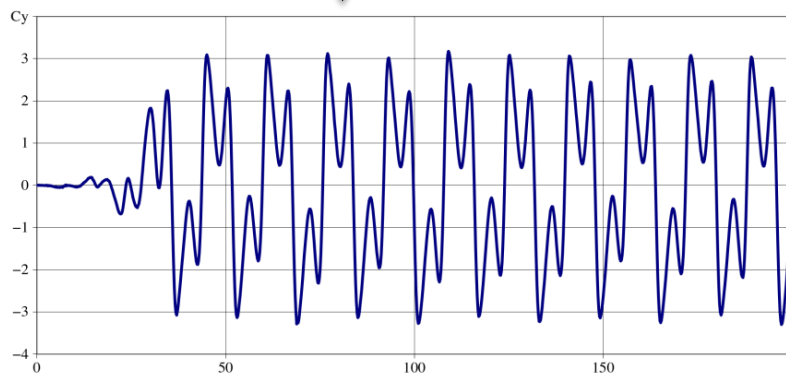
$f/f_k=1.6$

Резонансные режимы

$A=0.875$
 $Re=570$

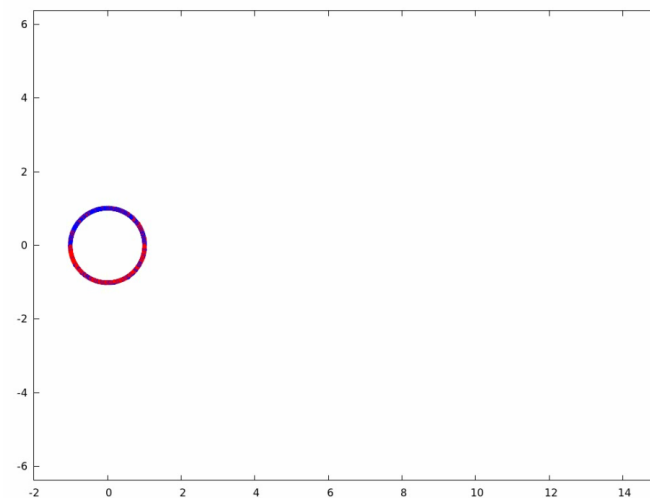
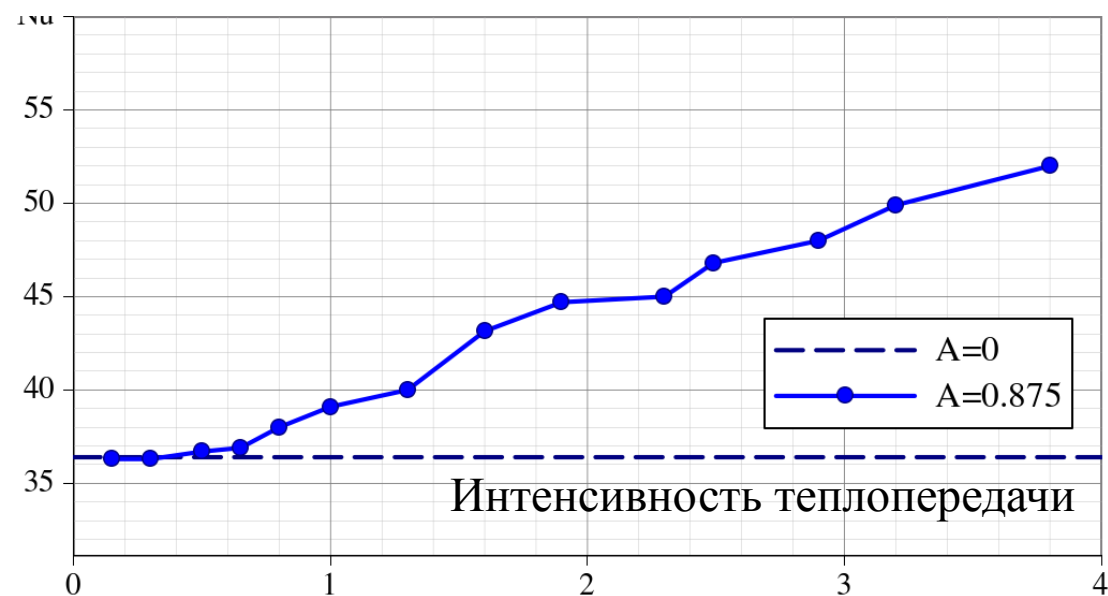
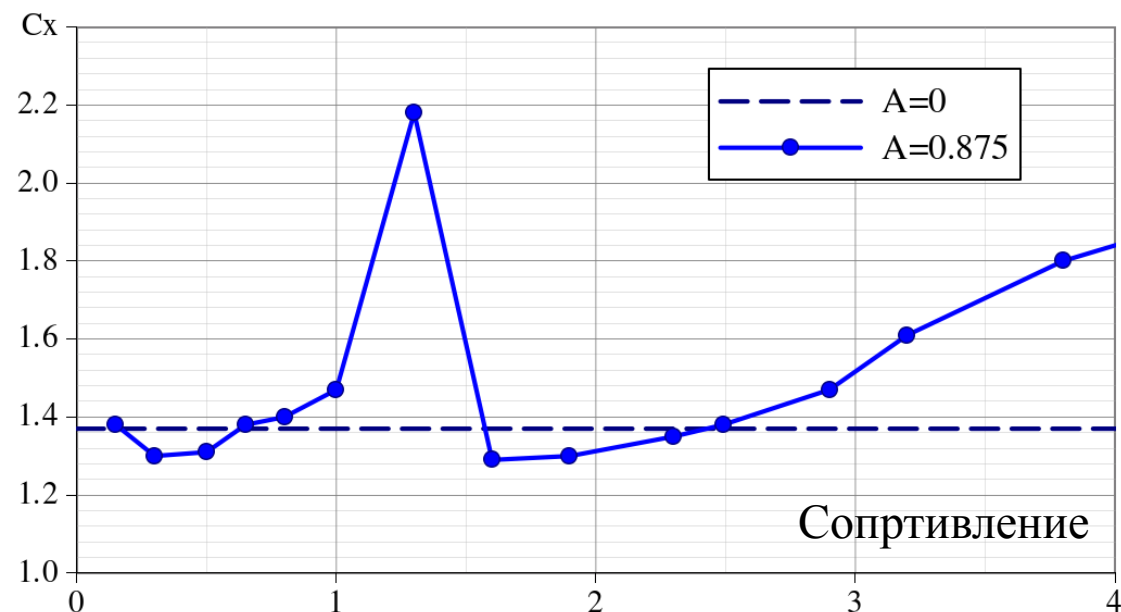


$Re=570$
 $A=0.875$
 $f/f_k=1.3$

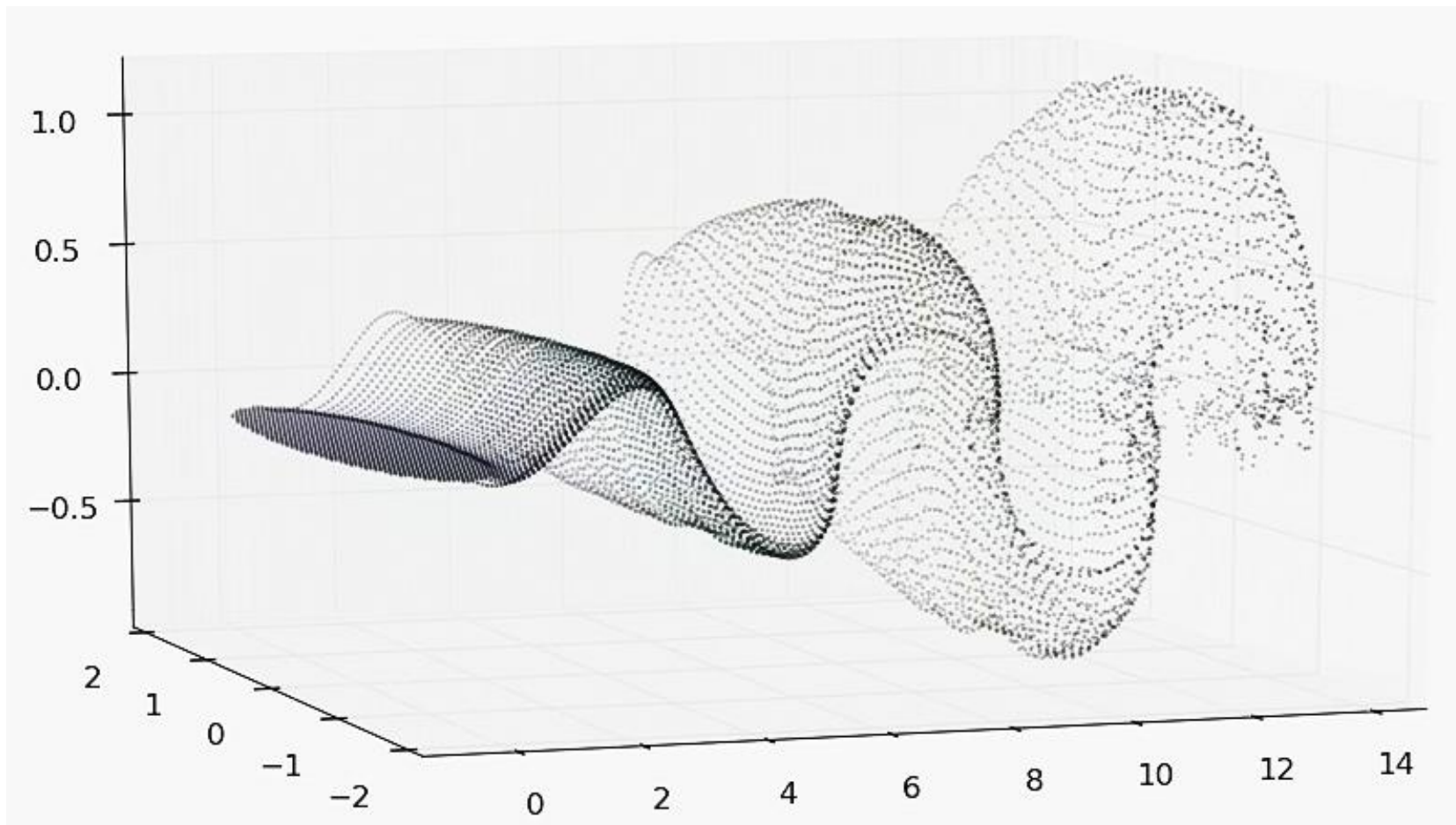


Интегральные тепло- гидродинамические характеристики

$Re=570$
 $Pr=1$



Осциллирующие тела



Интерактивный визуализатор

