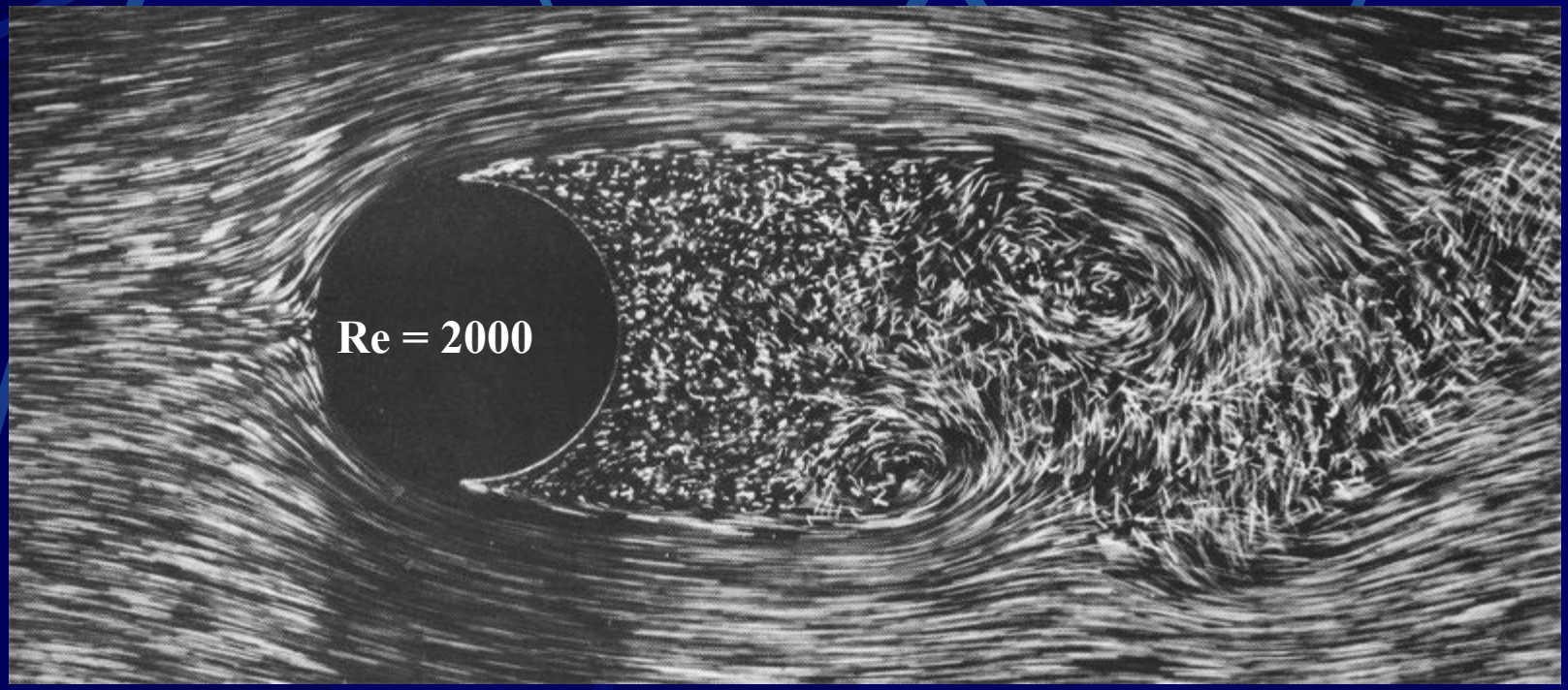
Проектирование и эффективная реализация средств численного моделирования в задачах вихревой гидроаэродинамики

С.В. Гувернюк, Д.А. Григоренко, А.И. Гирча, П. Р. Андронов, Г.Я. Дынникова

НИИ механики МГУ

Плоские нестационарные течения вязкой (или идеальной) несжимаемой жидкости



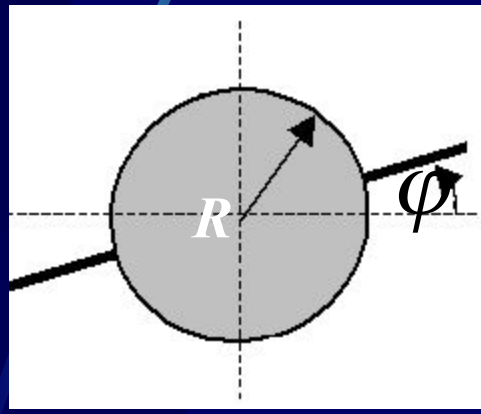
Связанная задача: совместное решение уравнений гидродинамики и динамики при движении тела в жидкости

Используемые математические модели

- В качестве базовых моделей среды используется две:
  - модель идеальной несжимаемой жидкости (двумерные уравнения Эйлера)
  - модель вязкой несжимаемой жидкости (двумерные уравнения Навье-Стокса)
- Во всех случаях начальное состояние среды – покой во всем пространстве
- Движущиеся тела – двумерные, произвольной формы конечной толщины
- Граничные условия:
  - условие прилипания (в вязкой жидкости)
  - условие непротекания с априорным заданием точек отрыва (в идеальной жидкости)

«Вихревая» формулировка плоской сопряжённой задачи динамики и аэрогидродинамики

В начальный момент среда и тело покоятся в неограниченном пространстве. Тело начинает двигаться под действием внешних сил , моментов и наложенных связей, испытывая также дополнительное влияние аэродинамических сил и моментов со стороны среды, возмущённой движением тела.



$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0\,, \quad \boldsymbol{\Omega} = \mathrm{rot}\,\mathbf{V}\,,$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \Omega \times \mathbf{V} = -grad\left(\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2}\right) + \nu\,\Delta \mathbf{V},$$

$$J\ddot{\varphi}\mathbf{e}_z + m\left(\mathbf{R}_\mathbf{m} \times \ddot{\mathbf{V}}_\mathbf{m}\right) = \mathbf{M}_{ext} + \mathbf{M}_a\,; \quad m\frac{d\,\mathbf{V}_\mathbf{m}}{dt} = \mathbf{F}_{ext} + \mathbf{F}_a$$

$$\frac{\partial\,\boldsymbol{\Omega}}{\partial\,\mathrm{t}} = \mathrm{rot}\left(\mathbf{V} \times \boldsymbol{\Omega} + \nu\Delta\mathbf{V}\right), \quad \boldsymbol{\Omega} = \Omega\,\mathbf{e}_z\,, \quad \mathbf{F}_a = -\frac{d\,\mathbf{P}_{fluid}}{dt}\,, \quad \mathbf{M}_a = -\frac{d\,\mathbf{K}_{fluid}}{dt}$$

$$\mathbf{P}_{fluid} = \rho\int_{Sext}\mathbf{r} \times \boldsymbol{\Omega}\,ds - \rho\oint_L \mathbf{r}_s \times \left(\mathbf{V}_s \times \mathbf{n}_s\right)dl \qquad \mathbf{K}_{fluid} = -0{,}5\,\rho\int_{Sext}\mathbf{r}^2\,\boldsymbol{\Omega}\,ds + 0{,}5\,\rho\oint_L \mathbf{r}_s^2\left(\mathbf{V}_s \times \mathbf{n}_s\right)dl$$

- гидродинамический импульс среды (Г. Ламб, 1947)

- вращательный импульс среды (Г. Ламб, 1947)

- P.G.Saffman. Vortex Dynamics (1992)

Для безвихревого движения теория развита Томсоном, Тэтом, Кирхгофом (1869).

Лагранжевы методы

- Метод дискретных вихрей (МДВ)

  С.М. Белоцерковский и др.

  - Модификации
  - Кратные цепочки ***С.Я. Герценштейн, С.В. Гувернюк, Х. Исванд***
- Метод вязких вихревых доменов (ВВД)

  П.Р. Андронов, С.В. Гувернюк, Г.Я. Дынникова

  - Уравнения Навье-Стокса
  - Генерация вихрей
  - Диффузионная скорость ***Y. Ogami, T. Akamatsu***

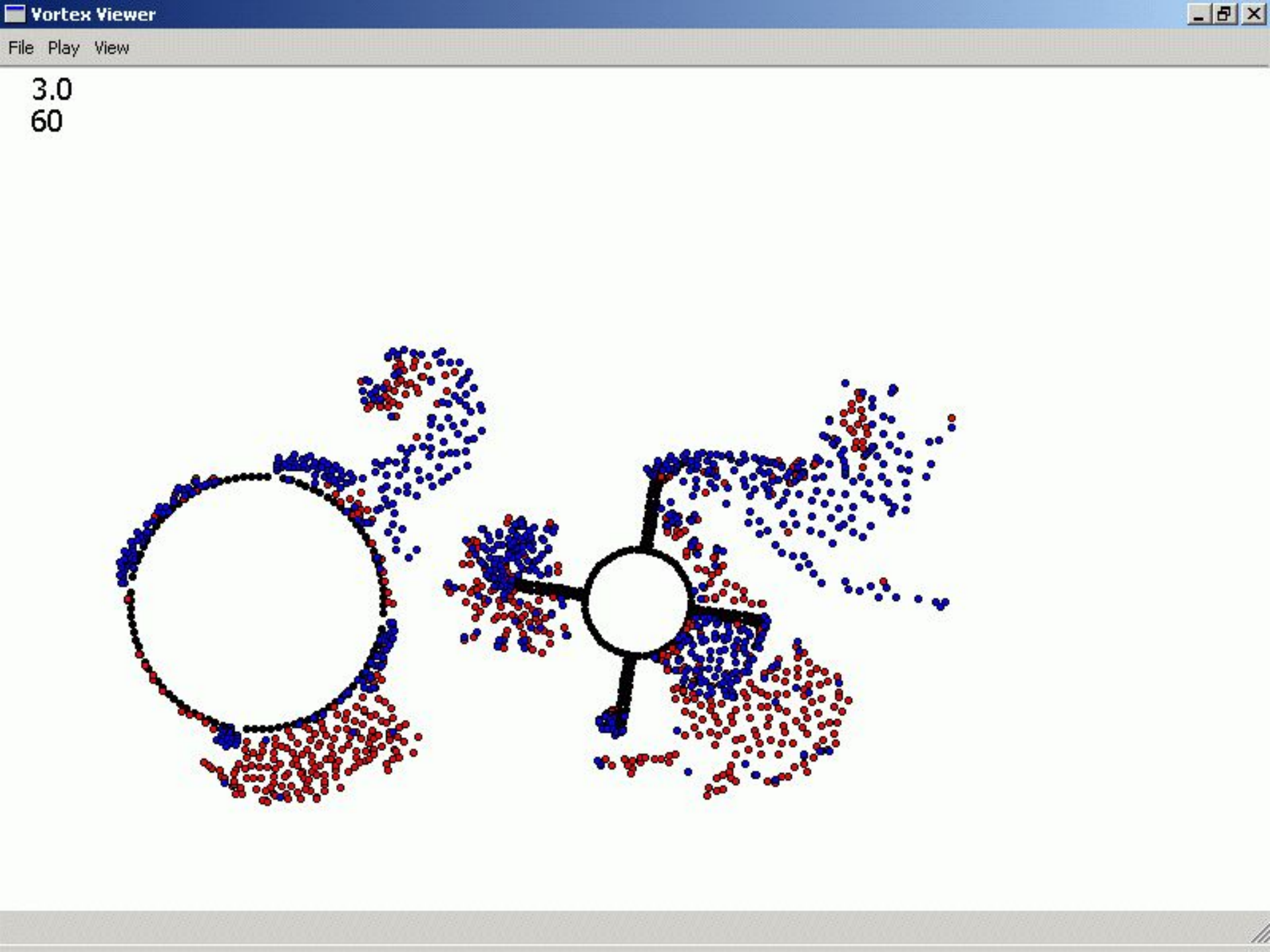

Vortex Viewer
File Play View
3.0
60

Схема алгоритма решения задач нестационарной гидродинамики

1. Вычисление циркуляции, обеспечивающей условие непротекания, нахождение скорости тел $O(N)$
2. Вычисление скорости движения жидкости в точках нахождения вихрей $O(N^2)$
3. Вычисление скорости смещения вихря относительно жидкости, связанной с диффузией (диффузионной скорости Vd) $O(N^2)$
4. Перемещение вихрей $O(N)$
5. Аннигиляция близко расположенных вихрей противоположного знака $O(N^2)$

Требования

- Необходимо обобщение
- Различные типы тел
- Различные типы взаимодействия

- Эффективность
- Переносимость
- Расширяемость
- Отчуждаемость

Структура комплекса

- Средства подготовки заданий
  - Скрипты
- Средства расчета
- Средства обработки результатов
  - Скрипты
- Дополнительные средства (GUI)
- Сторонние программы

Обобщенный алгоритм

- Единые обозначения величин
- Подробное описание, вспомогательные формулы
- Замкнутые двумерные тела произвольной формы
- Случаи идеальной и вязкой среды
- Число степеней свободы 0, 1, 2, 3
- Возможны внешние силы
- Различные сценарии схода вихрей
- Несколько не сталкивающихся тел
- Множество рассчитываемых параметров (Cx,Cy,F,V,P,t…)

Архитектура

Счетная программа:

- ООП
- C++

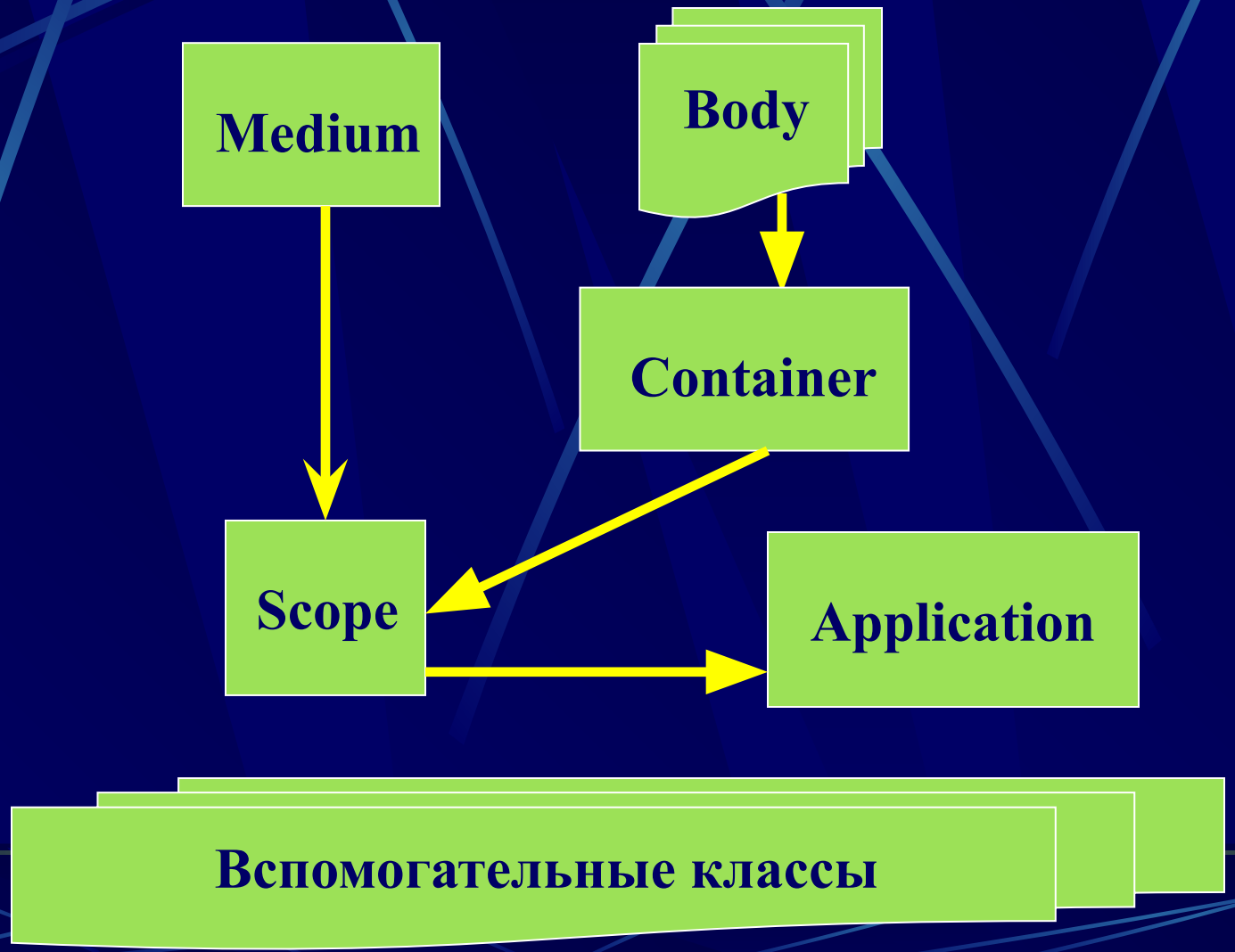
Графический интерфейс:

- Python
- Qt

Концепция:

- Open Source
- GPL

Структура программы



Эффективность

Факторы:

- Прозрачность кода
- Переносимость

Основная проблема: расчет поля скоростей

Пути повышения:

- Оптимизация
  - Профилирование
  - Использование возможностей компилятора
  - Распараллеливание
- Изменение алгоритма

Алгоритмы

- Точные (N^2)
- Приближенные (до $N\log(N)$)

Отличия от классической задачи n тел:

- Аннигиляция вихрей
- Нет симметрии

Использование Т-системы

- Автоматическая балансировка загрузки
- Гетерогенность (сериализация)
- Новые возможности (в сравнении с MPI)

Недостатки:

- Лишние пересылки данных
- Тонкие ограничения на C++
  - Модификатор static

Время работы **MPI**

	1	2	4	8
Без объединения вихрей 30 шагов	240 1 100%	130 1.85 92%	91 2.64 66%	68 3.53 44%
С объединением вихрей 30 шагов	24 1 100%	18 1.33 67%	16 1.5 38%	25 0.97 12%
С объединением вихрей 60 шагов	198 1 100%	114 1.74 87%	74 2.68 67%	69 2.87 36%

T-система vs MPI

Вычислительные машины:

- AMD Athlon(tm) 64 Processor 3000+
- Intel(R) Celeron(R) CPU 2.53GHz

Результаты

- T-система (Celeron+Athlon): 70 секунд
- MPI (Celeron+Athlon): 105 секунд
- Athlon: 73 секунды
- Celeron: 171 секунда
- Идеально: 51 секунда

Переносимость

- Windows (MSVC, Cygwin + g++)
- Linux (g++)
- AIX (xlC)

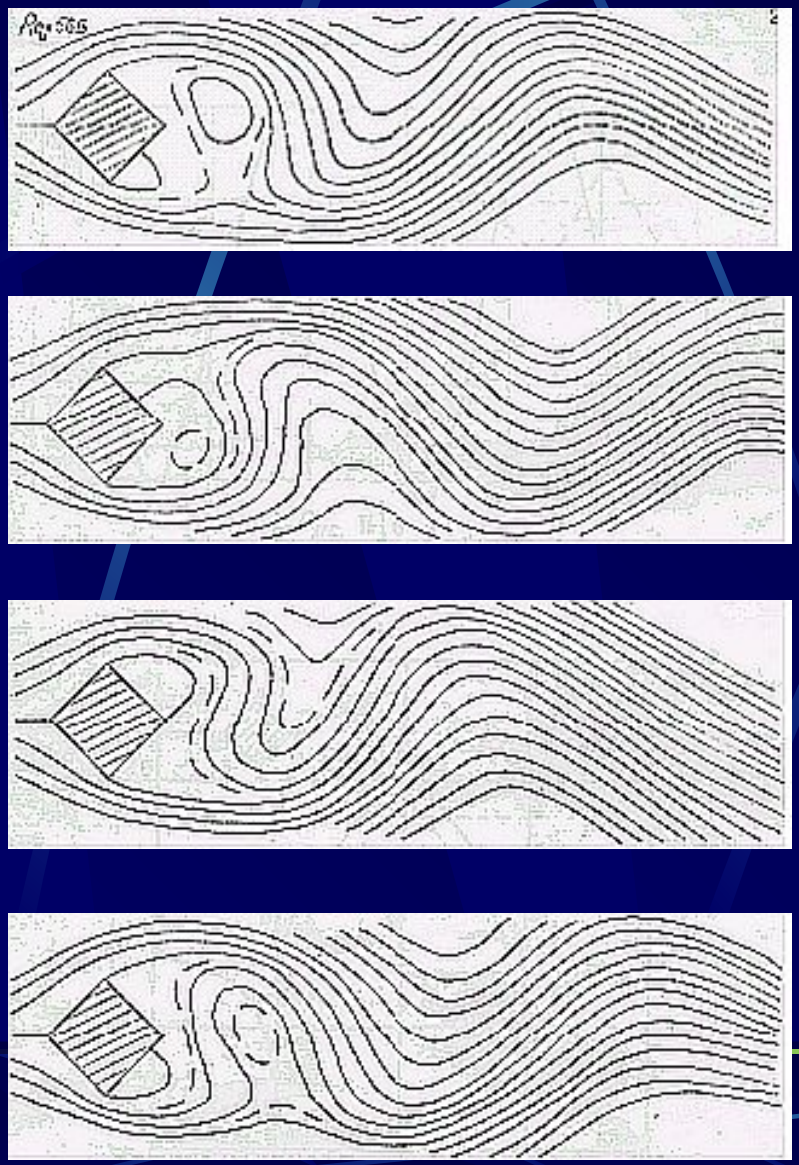
- MPI
- T-система

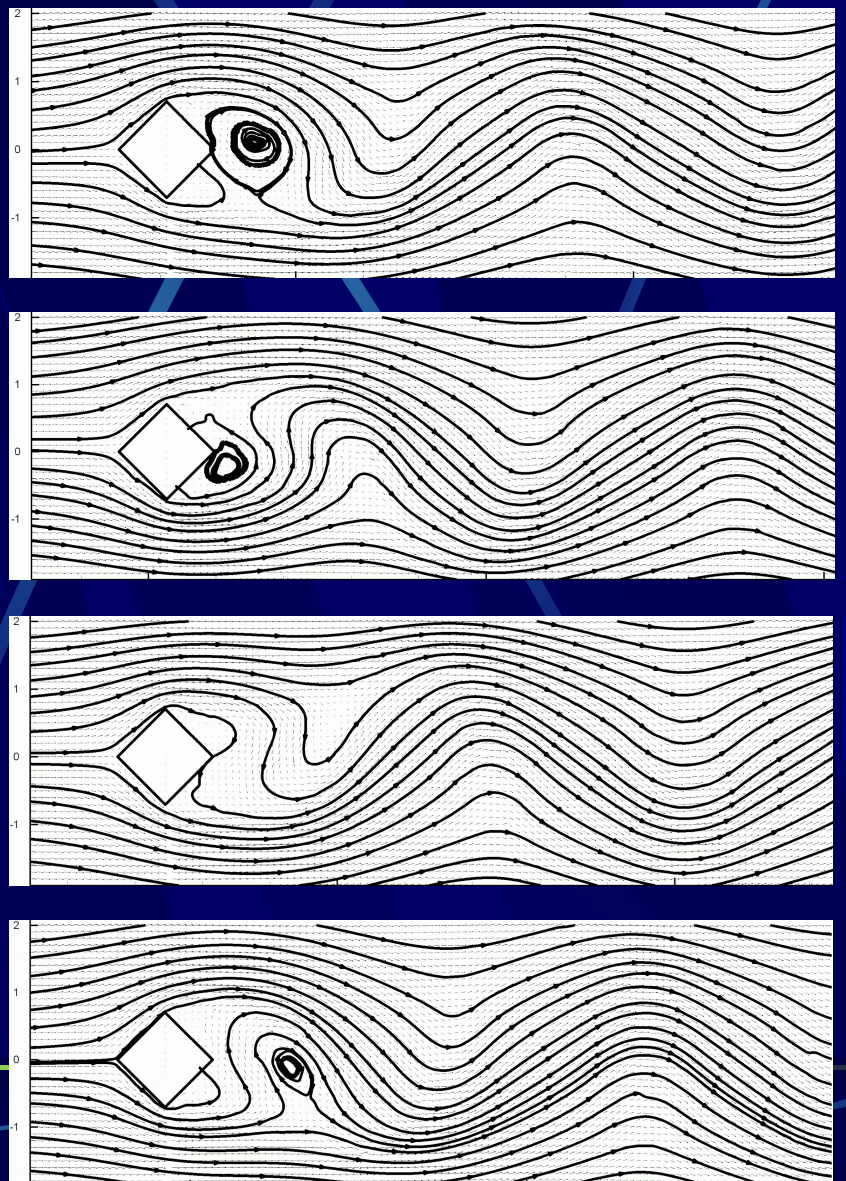
Трудности при переносе возможны

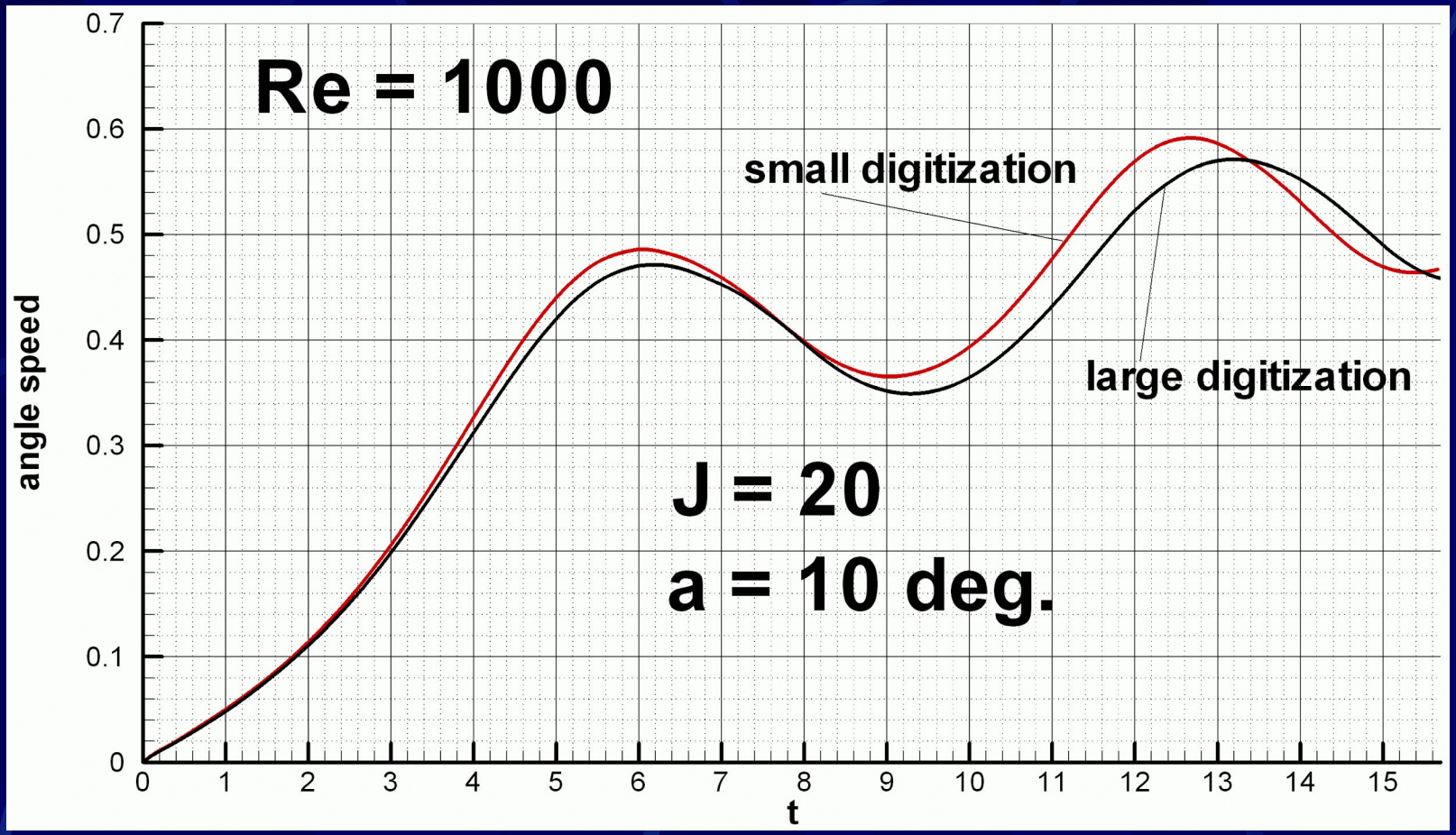
Достоверность результатов

- Теоретическое обоснование
- Проверка инвариантов
- Сравнение с расчетами
  - Библиотека GMP
  - Другие методы
- Сравнение с экспериментом

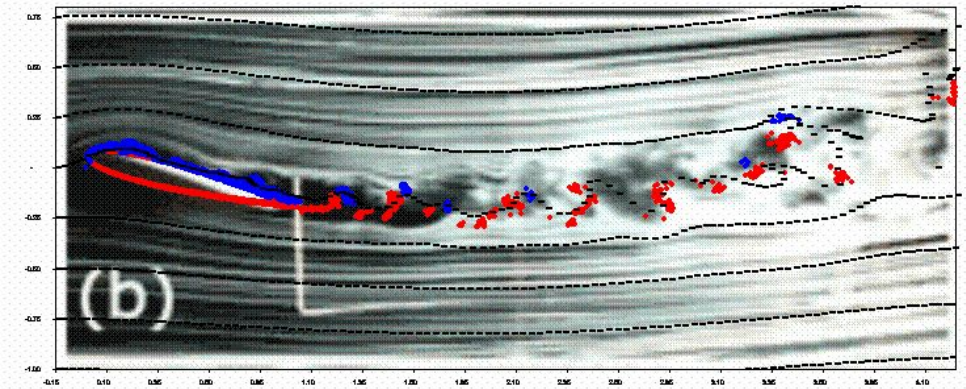
Нестационарное обтекание цилиндра квадратного сечения при Re = 57. Мгновенные линии тока. Слева – расчёт В.П. Шкадовой и др. (2004) сеточным методом при Re=56,6; справа – расчёт методом ВВД. Интервалы безразмерного времени между последовательными картинками слева и справа одинаковые.

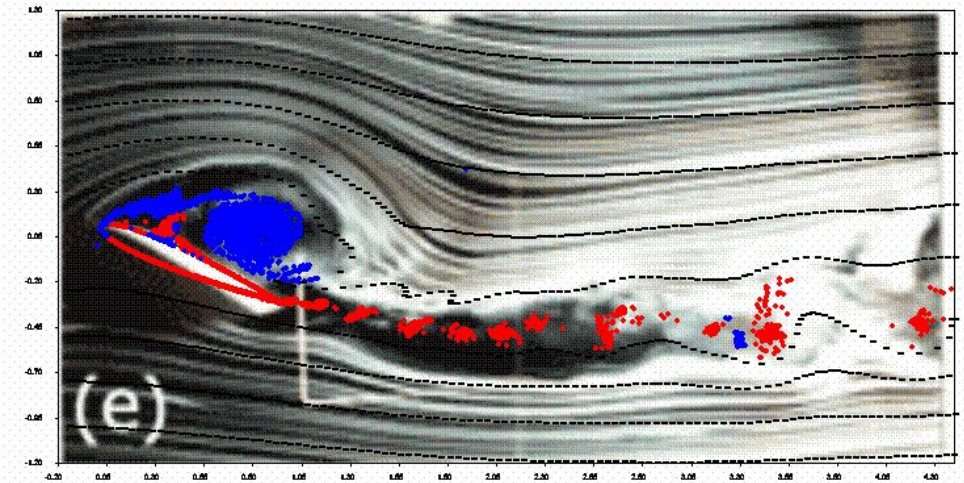






Результаты тестовых расчётов на основе метода ВВД при тех же начальных данных для случая Re=1000 при разной степени дискретизации по времени и по пространству: чёрная линия – при разбиении контура пластины на 164 отрезка и при шаге по времени 0,025, красная линия – при разбиении контура пластины на 328 отрезков и при шаге по времени 0,0125. Максимальное наблюдавшееся отличие угловой скорости при разной степени дискретизации составляет около 5%.



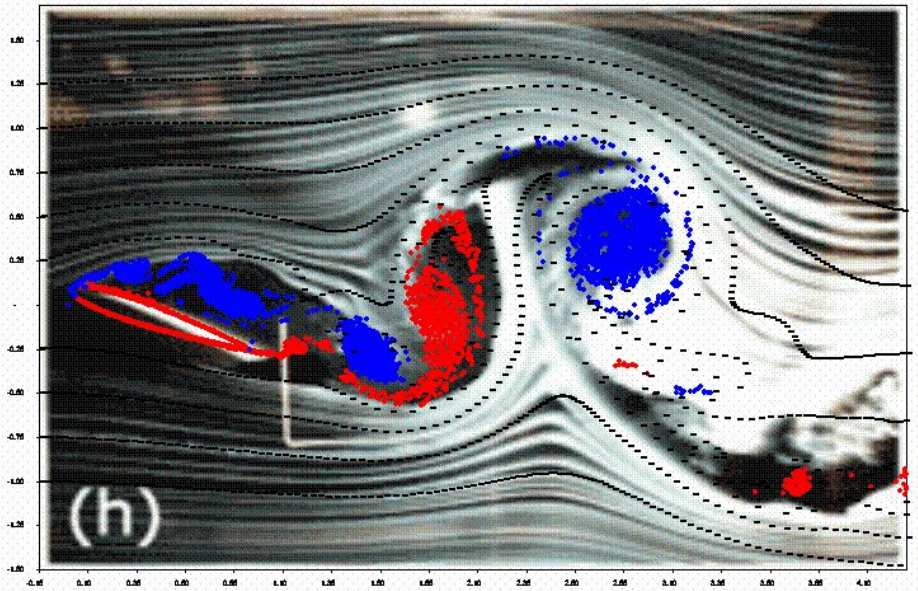


Сравнение расчётной и экспериментальной картин обтекания колеблющегося крылового профиля. Re=44 000

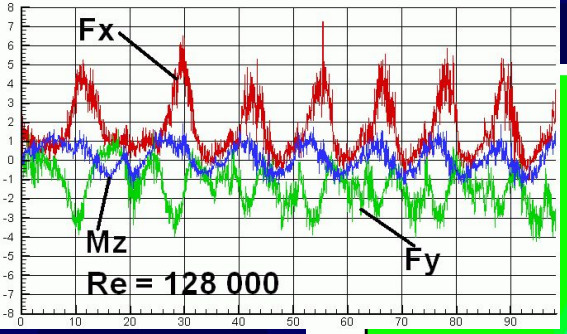
Чёрные точки – расчётная визуализация положения частиц пассивной примеси.

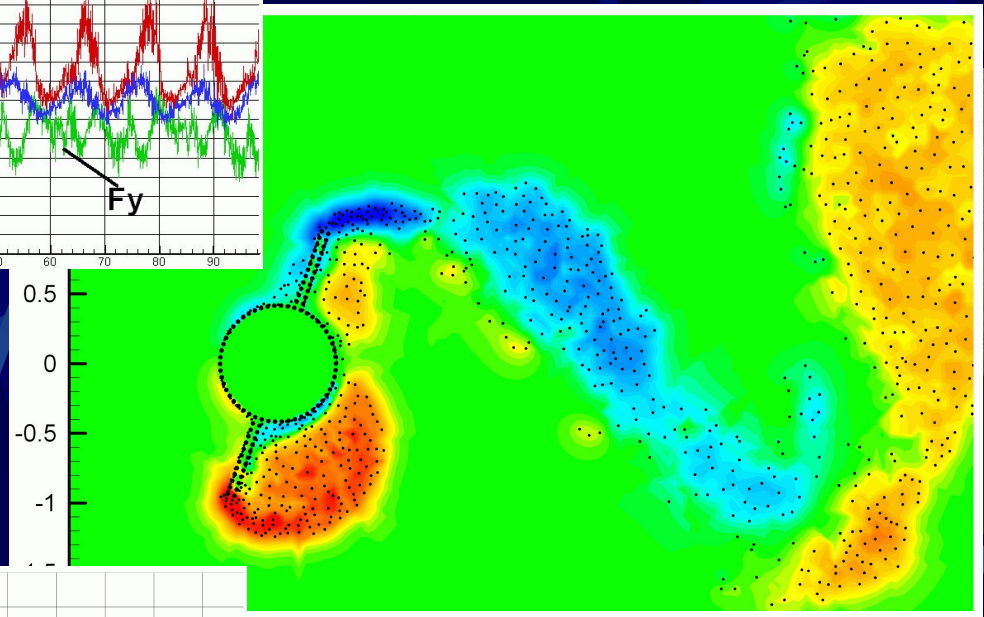
Красные точки – положительные вихри, синие точки – отрицательные вихри.

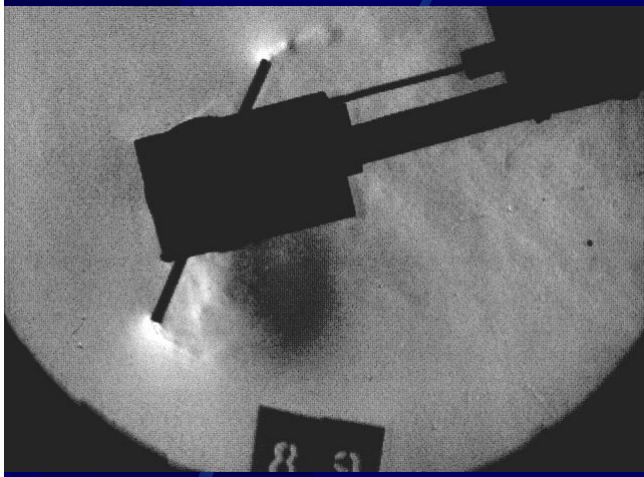
Поток направлен слева.
Светлые линии – дымовая визуализация мгновенного поля течения в эксперименте.
Степень дискретизации профиля в расчёте - 247 отрезков.



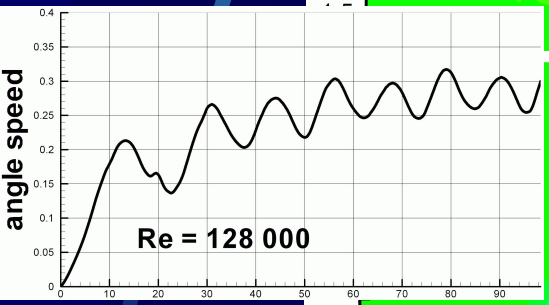
НИИ механики МГУ, аэродинамическая труба А-8; 2003-2005 гг.

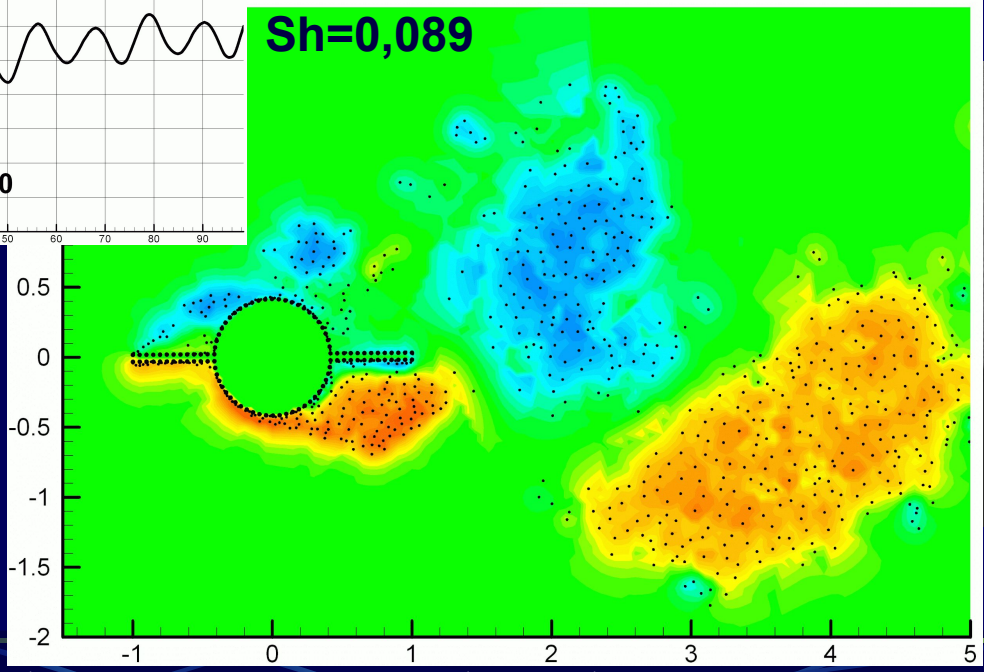


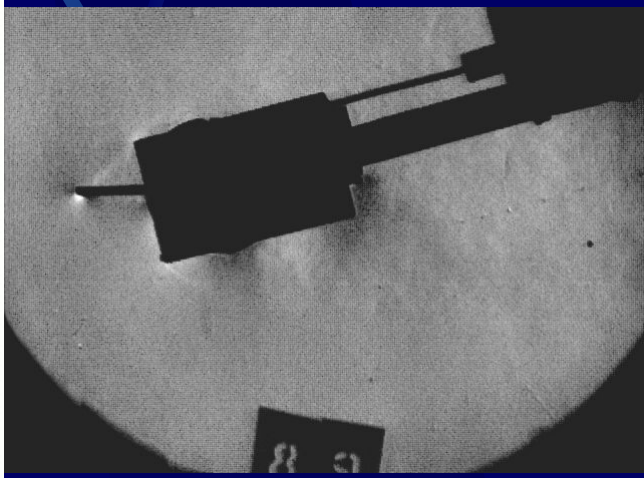




Sh=0,064





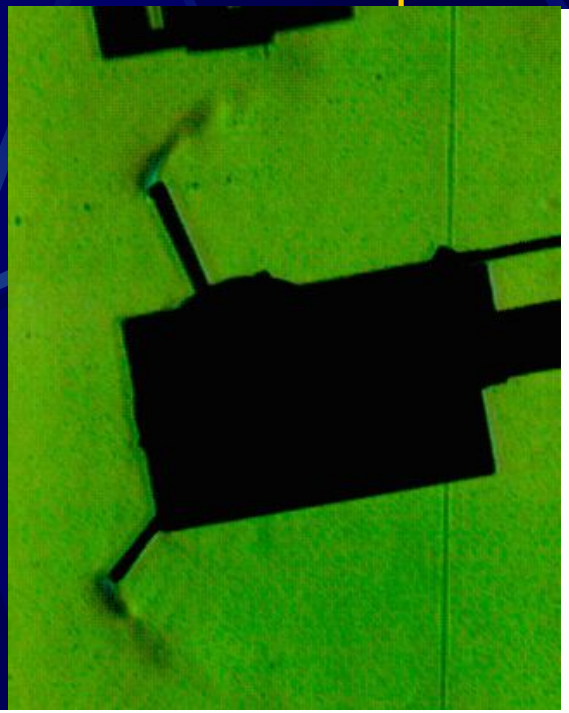


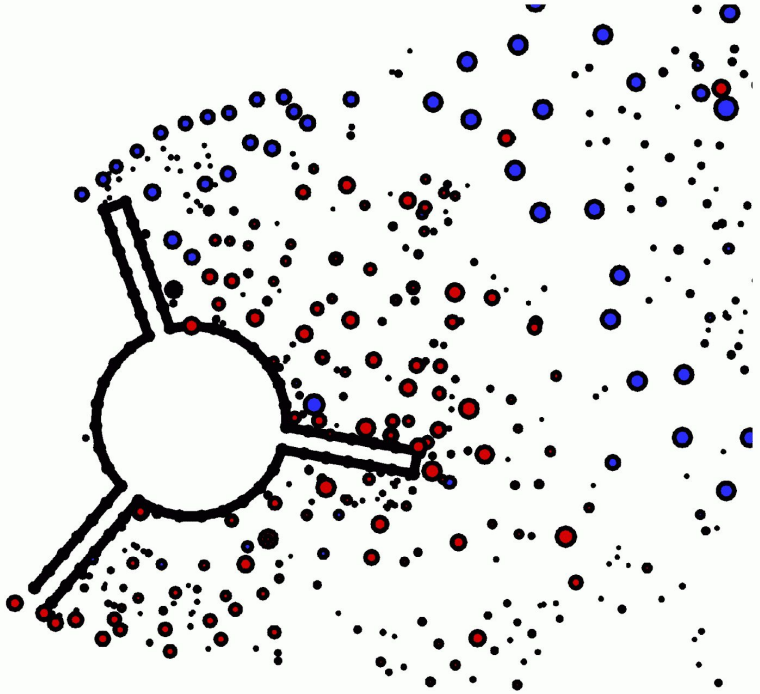
Re = 128 000

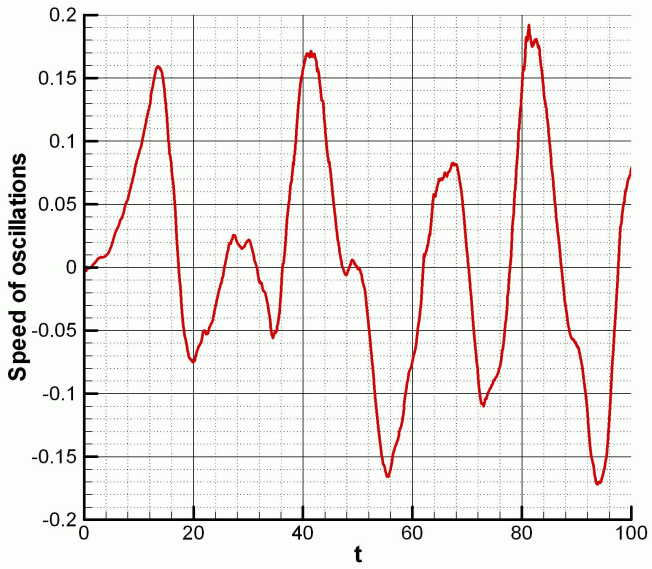
Расчётная (слева) и экспериментальная (справа) картины течения при авторотации вертушки с двумя лопастями для различных фаз поворота (поток слева направо, вращение против часовой стрелки)

Сравнение с экспериментом (3 лопасти)

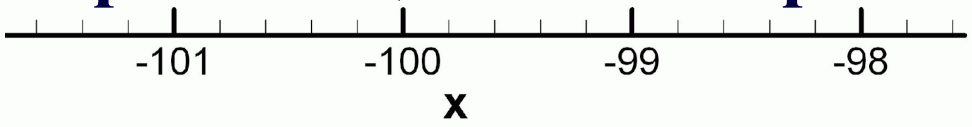
Автоколебания
Скорость потока U=30 м/с,
длина лопасти
h*= 1,4 *R







Кратные цепочки вихрей

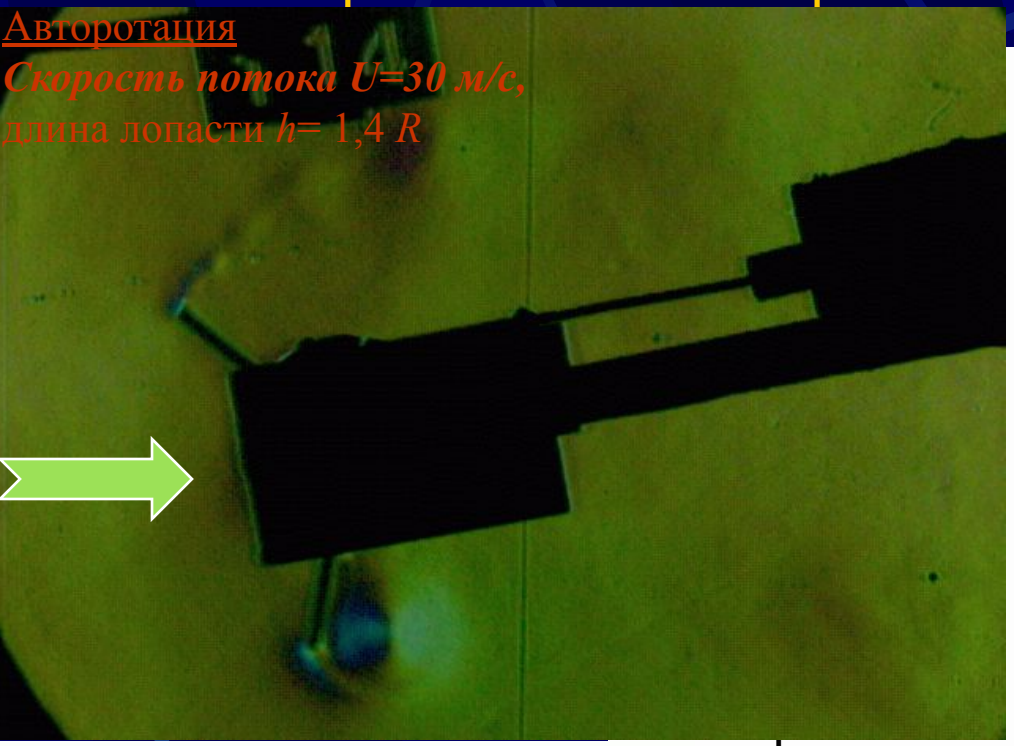


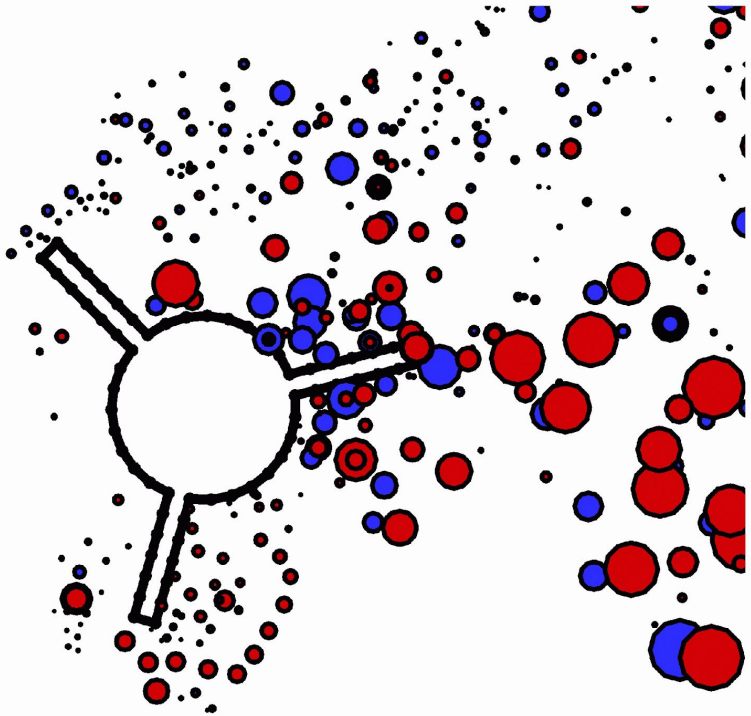
Сравнение с экспериментом (3 лопасти)

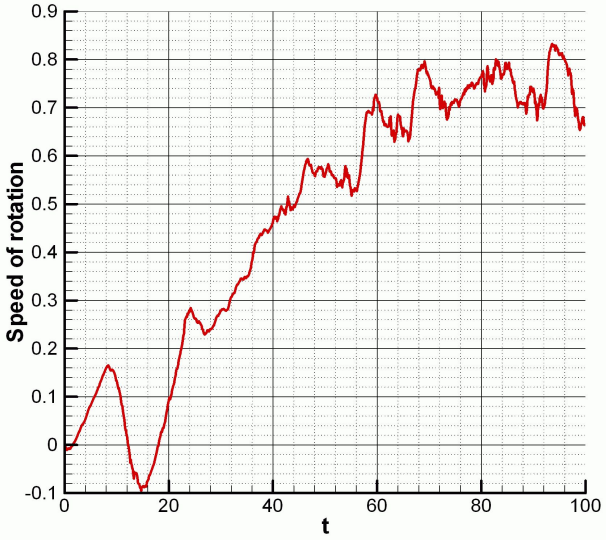
Авторотация

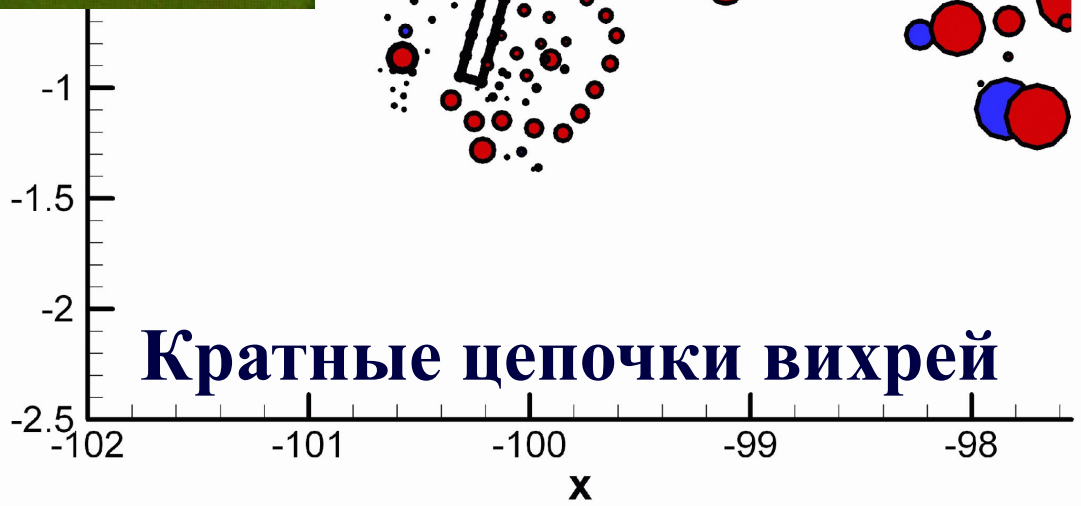
Скорость потока U=30 м/с,

длина лопасти $h = 1{,}4\ R$





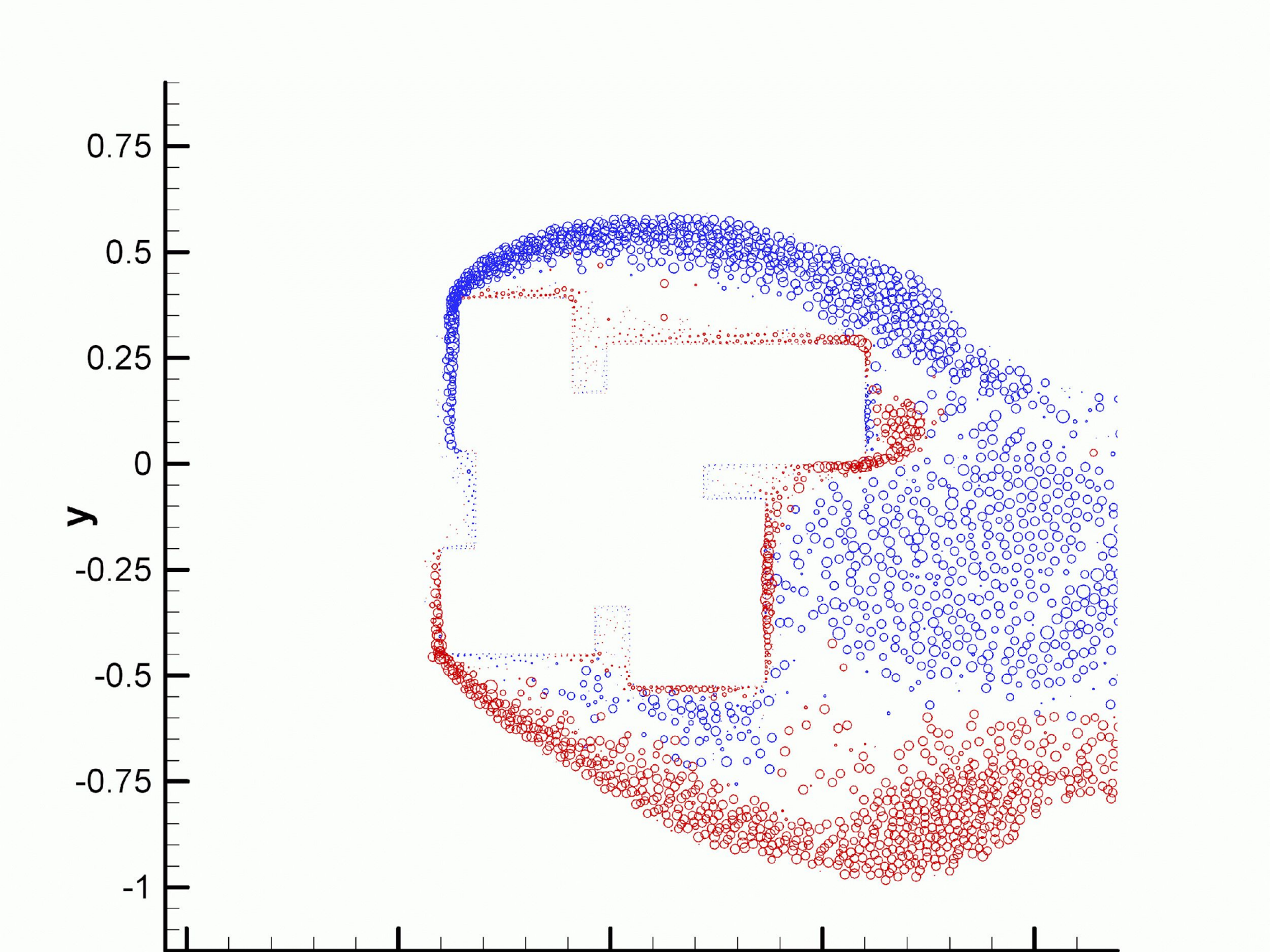


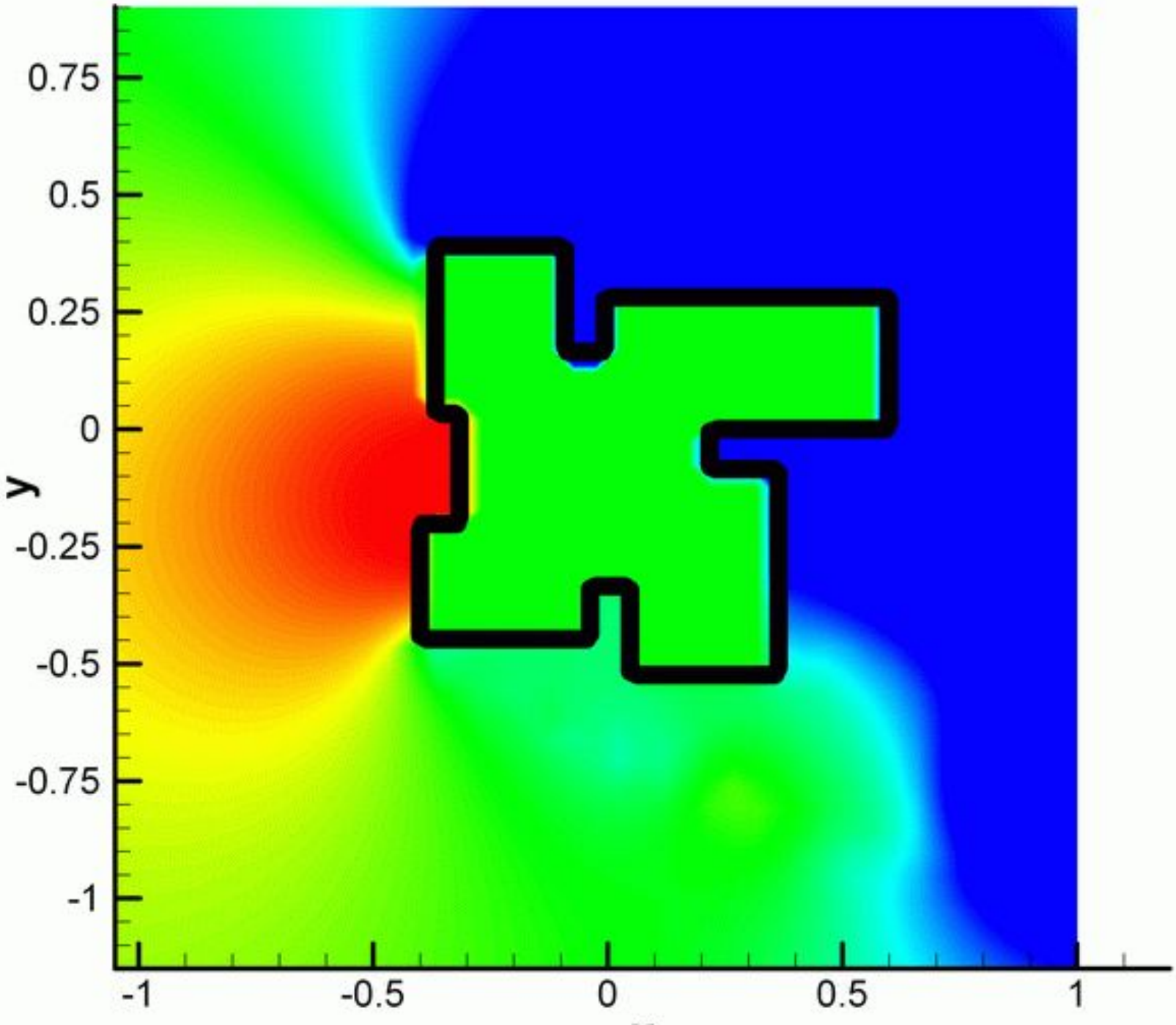


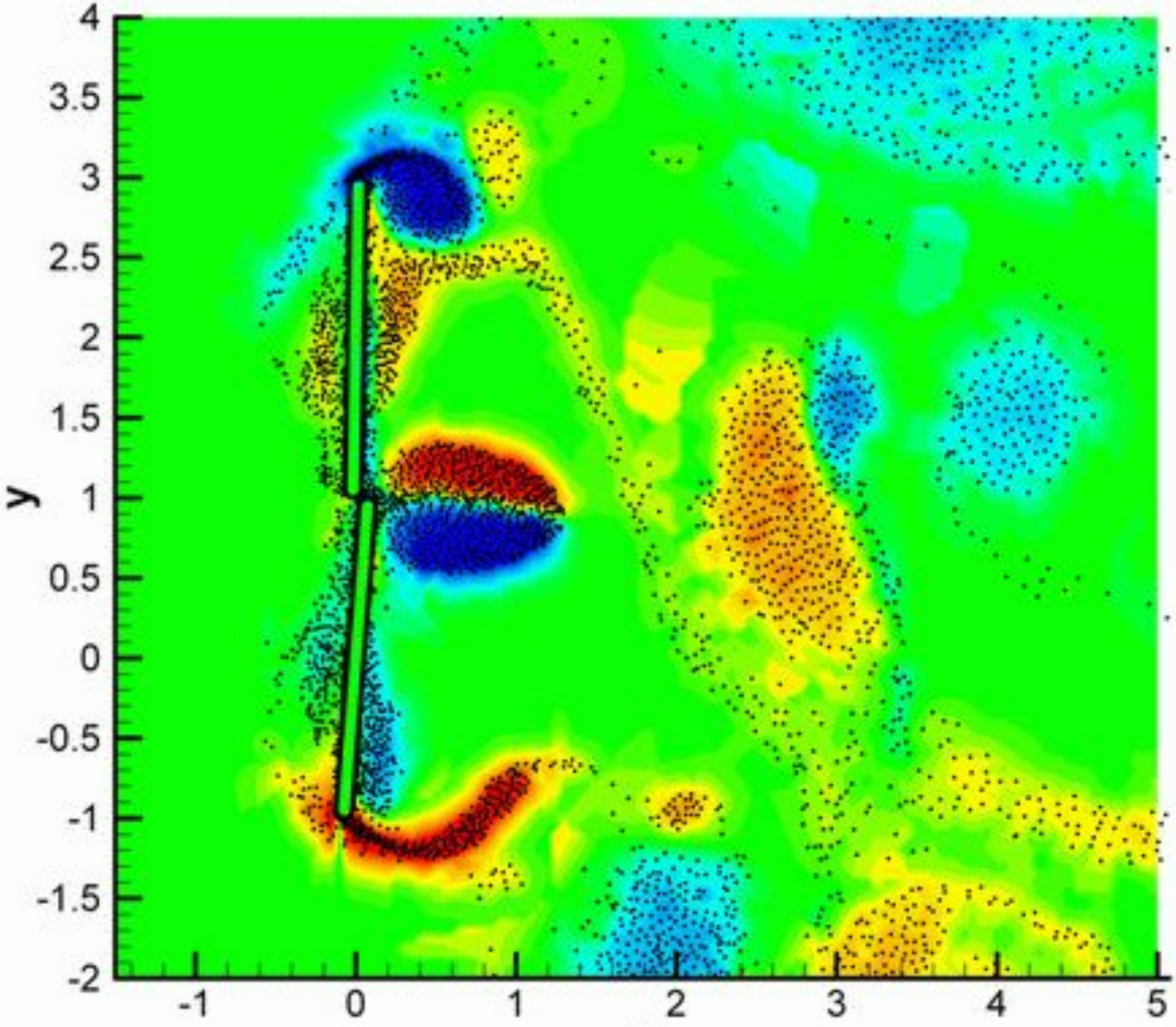
Кратные цепочки вихрей

Практическое применение

- Расчет мощности ветроэнергетических установок
- Ветровые нагрузки на высокие строения
- Нестационарные аэродинамические нагрузки на крыло
- Нестационарная теплопередача при обтекании нагретых цилиндров


0.75
0.5
0.25
0
-0.25
-0.5
-0.75
-1
y


0.75
0.5
0.25
0
-0.25
-0.5
-0.75
-1
y
-1
-0.5
0
0.5
1


y
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
-2
-1
0
1
2
3
4
5

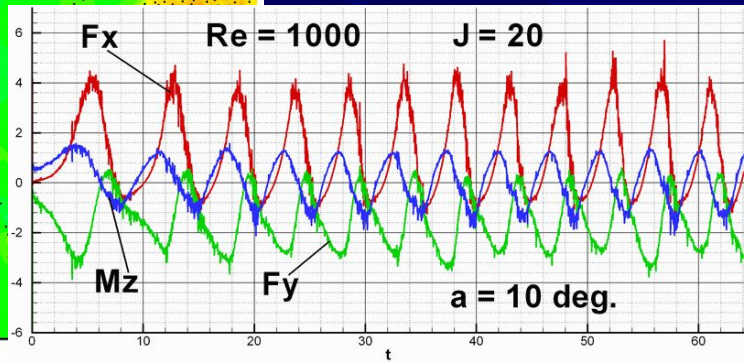
Расчёт методом ВВД эволюции поля завихренности при авторотации пластины для случая:

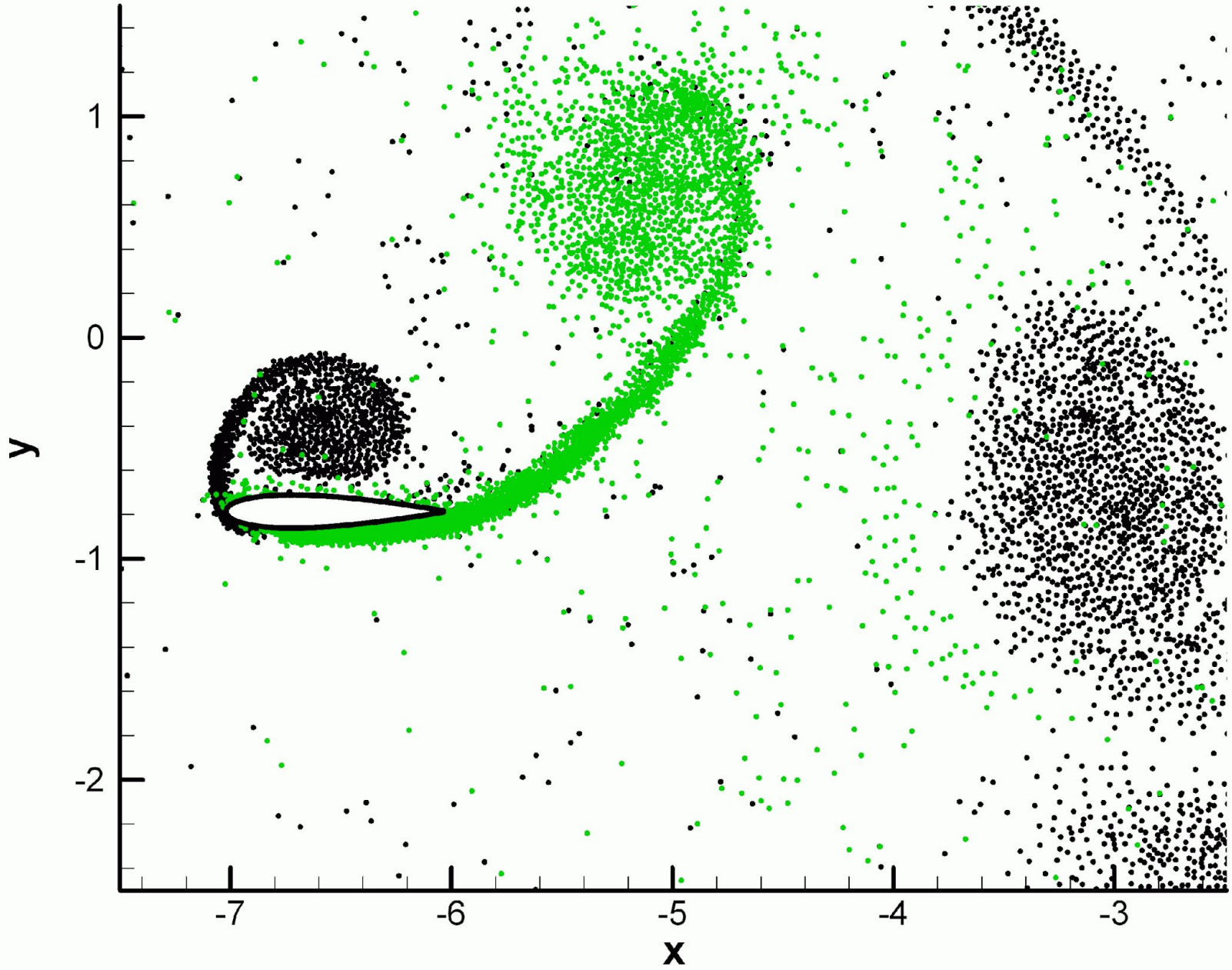
Re = 1000;

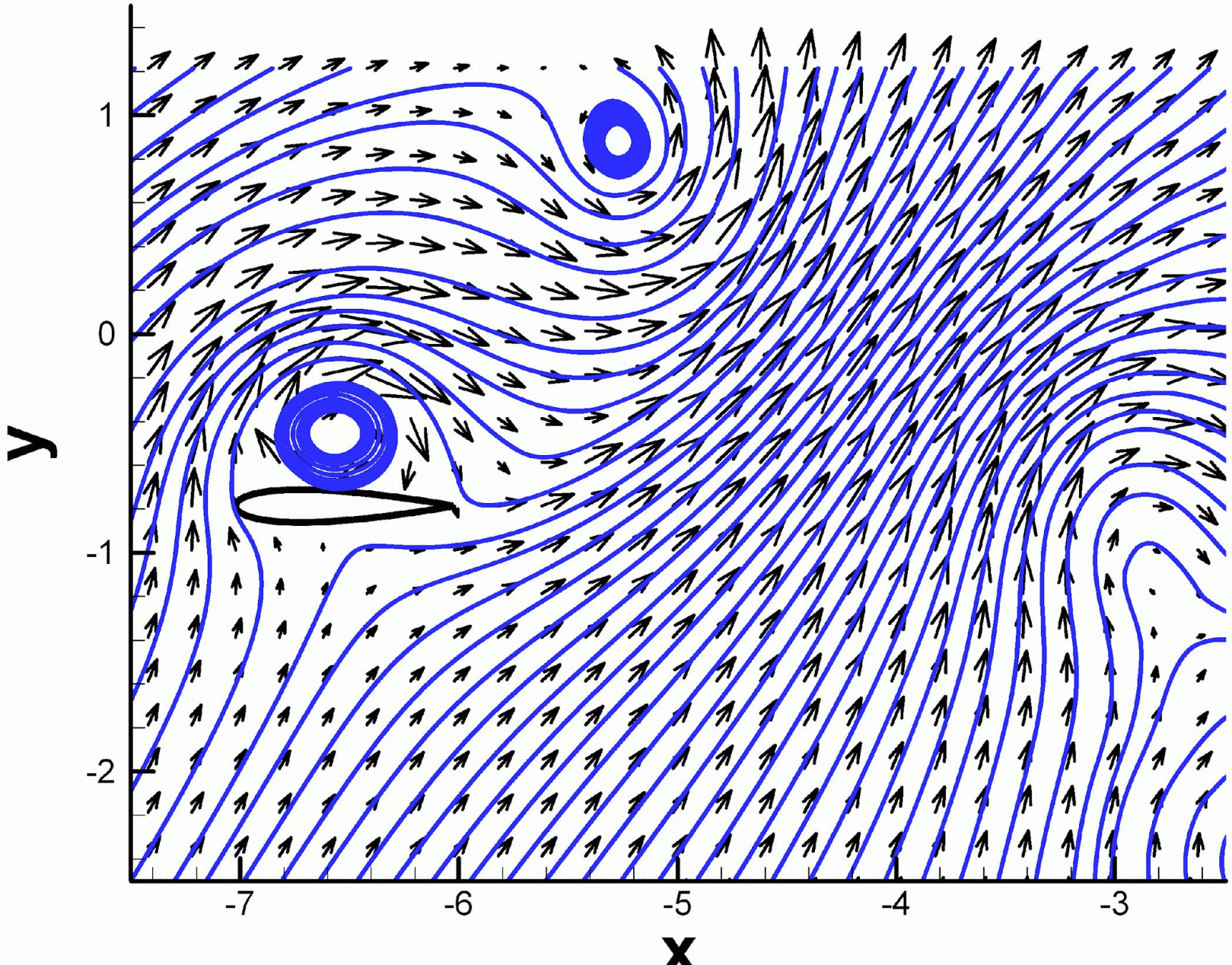
безразмерный момент инерции J = 20;

начальный угол поворота α = 10 градусов.

Шкала от синего до красного цвета соответствует изменению завихренности от –0,5 до +0,5.




1
0
-1
-2
y
-7
-6
-5
-4
-3
x


1
0
-1
-2
y
-7
-6
-5
-4
-3
x

Перспективы

- Дальнейшая профилировка и отладка
- Пересмотр структуры программы
- Применение приближенных методов задачи n тел
- Дополнительные связи на тело
- Теплообмен и теплоперенос
- Источники и стоки
- Реализация вспомогательных средств комплекса

Спасибо за внимание

Авторы выражают благодарность

Васенину В.А., Водомерову А.Н.