

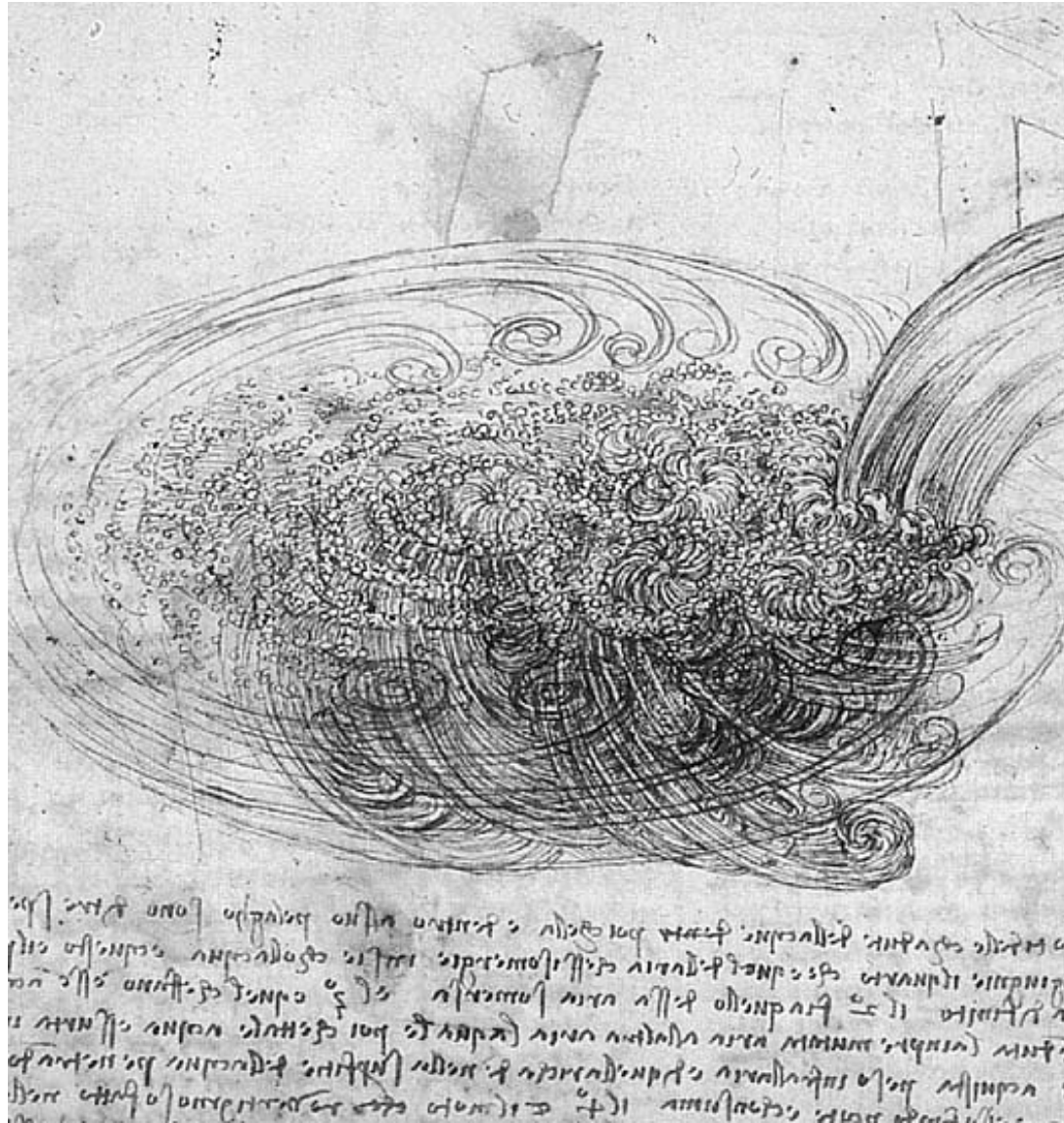
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Физико-механический институт  
Высшая школа прикладной математики и вычислительной физики

Курс лекций «Моделирование турбулентности»  
([http://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/turb\\_models](http://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/lecture/turb_models))

## Лекция 1

# Понятие турбулентности

Гарбарук Андрей Викторович ([agarbaruk@mail.ru](mailto:agarbaruk@mail.ru))  
2023

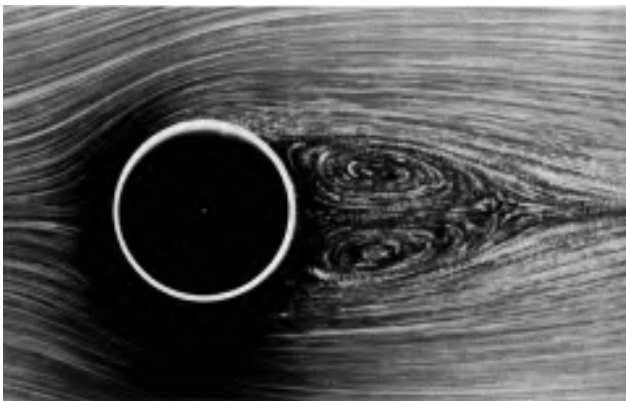
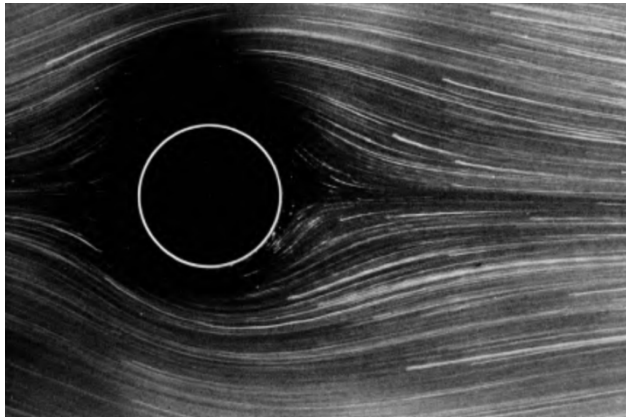


Турбулентные вихри. Рисунок Леонардо да Винчи

# Что такое турбулентное течение?

Течения сплошной среды

Стационарные  
(не зависят от времени)



Нестационарные



Обтекание круглого цилиндра при  
числах Рейнольдса 10, 25 и 140

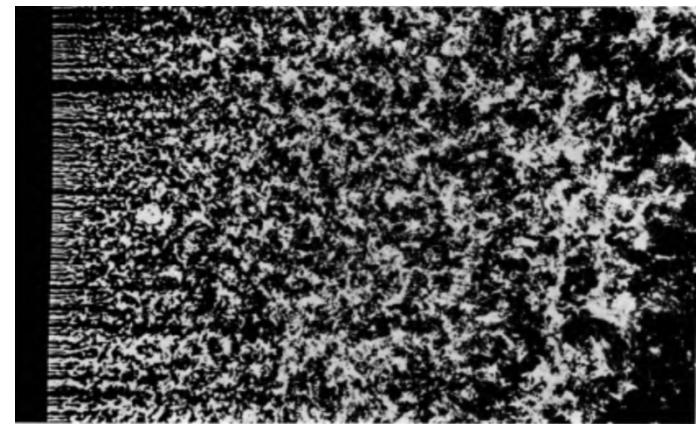
# Что такое турбулентное течение?

Нестационарные течения

Упорядоченные  
(можно заранее предсказать  
параметры потока в любой точке  
в любой момент времени)



Неупорядоченные



Волны на поверхности  
и течение за решеткой

# Что такое турбулентное течение?

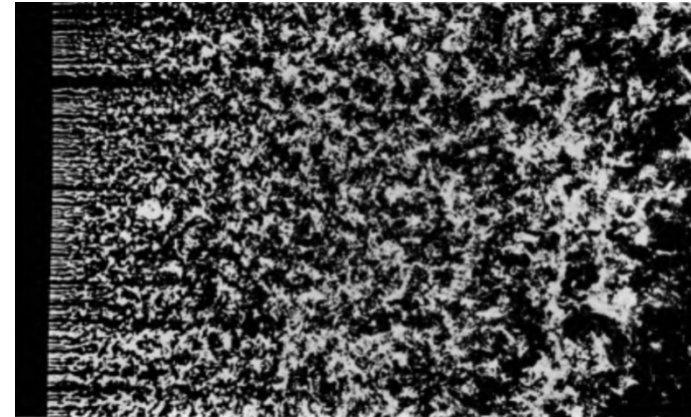
Неупорядоченные течения

Потенциальные  
(случайные волновые)

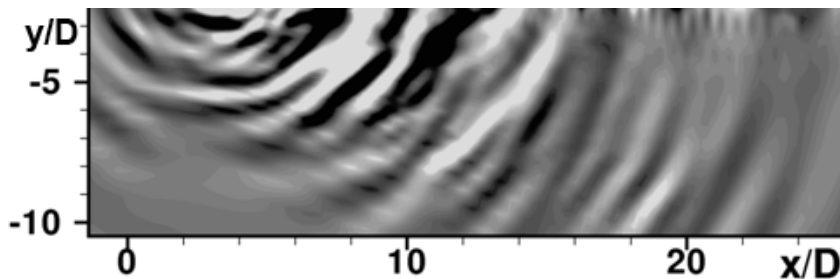


Волны на поверхности

Вязкие, вихревые  
(турбулентные)



Течение за решеткой



Акустические волны в пространстве

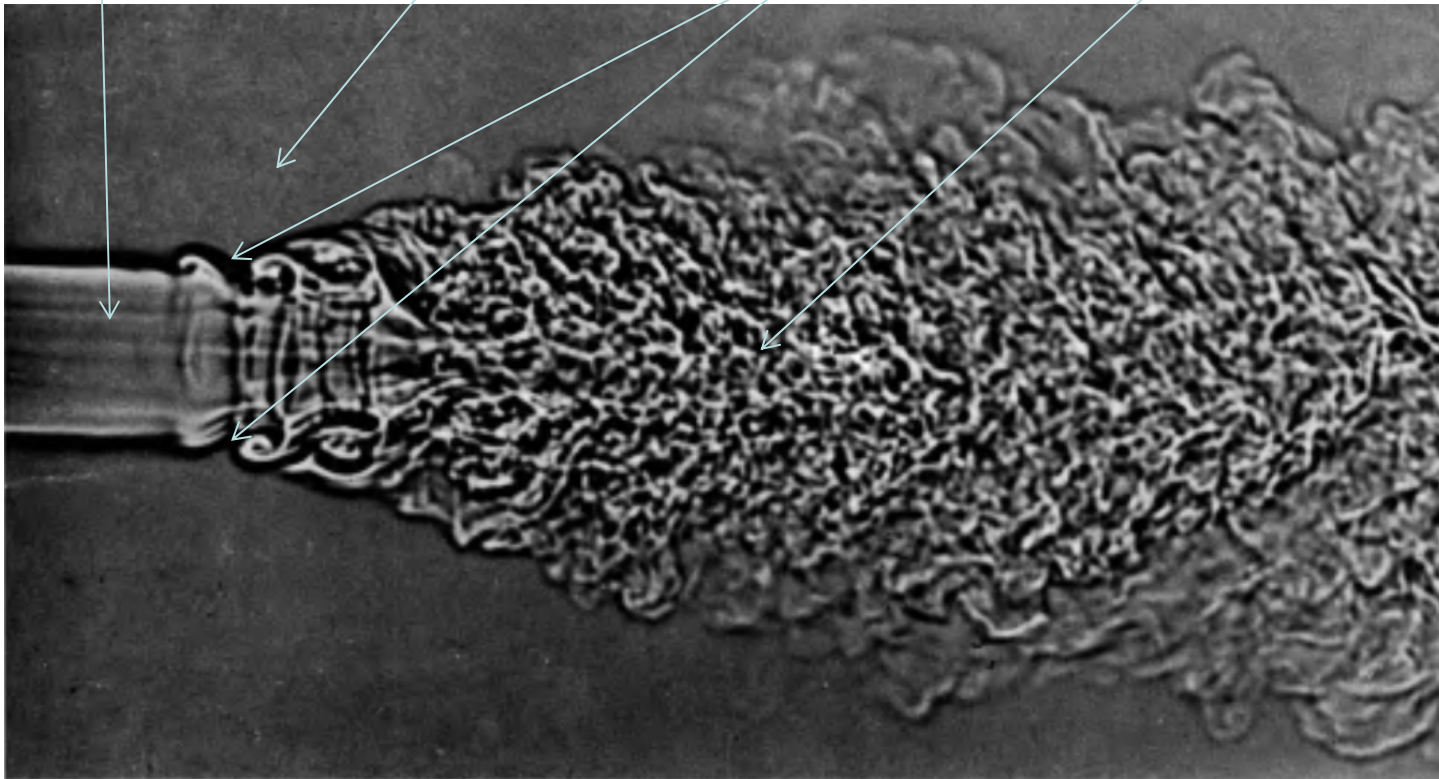


Пограничный слой на выпуклой поверхности



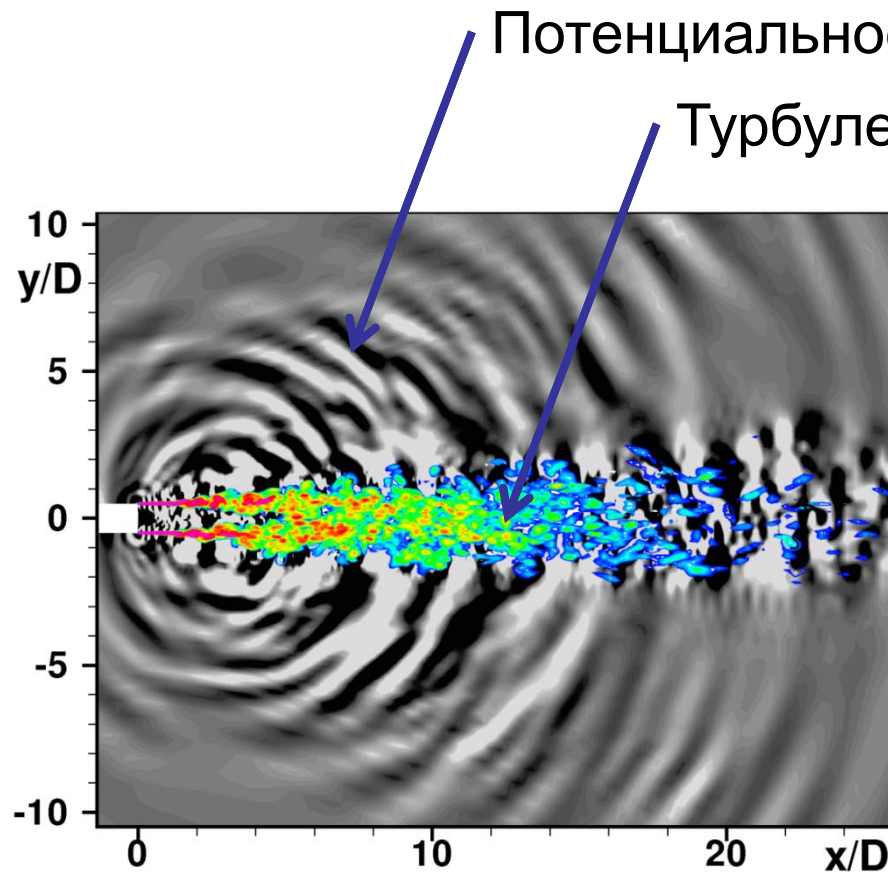
# Многие течения носят смешанный характер

Потенциальное течение      Турбулентное течение  
Ламинарное течение      Упорядоченные вихри

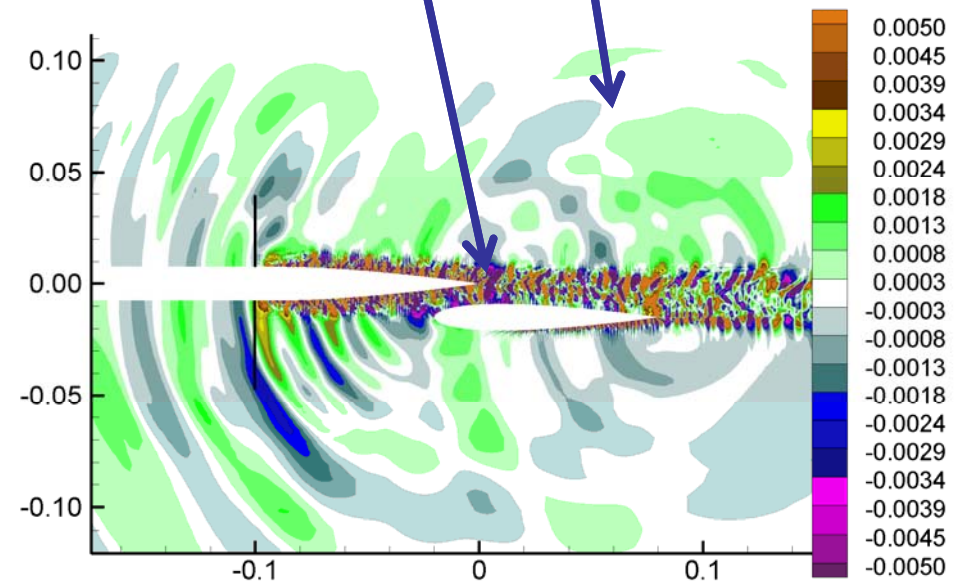


Течение в круглой затопленной струе

# Многие течения носят смешанный характер



Шум, возникающий при истечении круглой затопленной струи

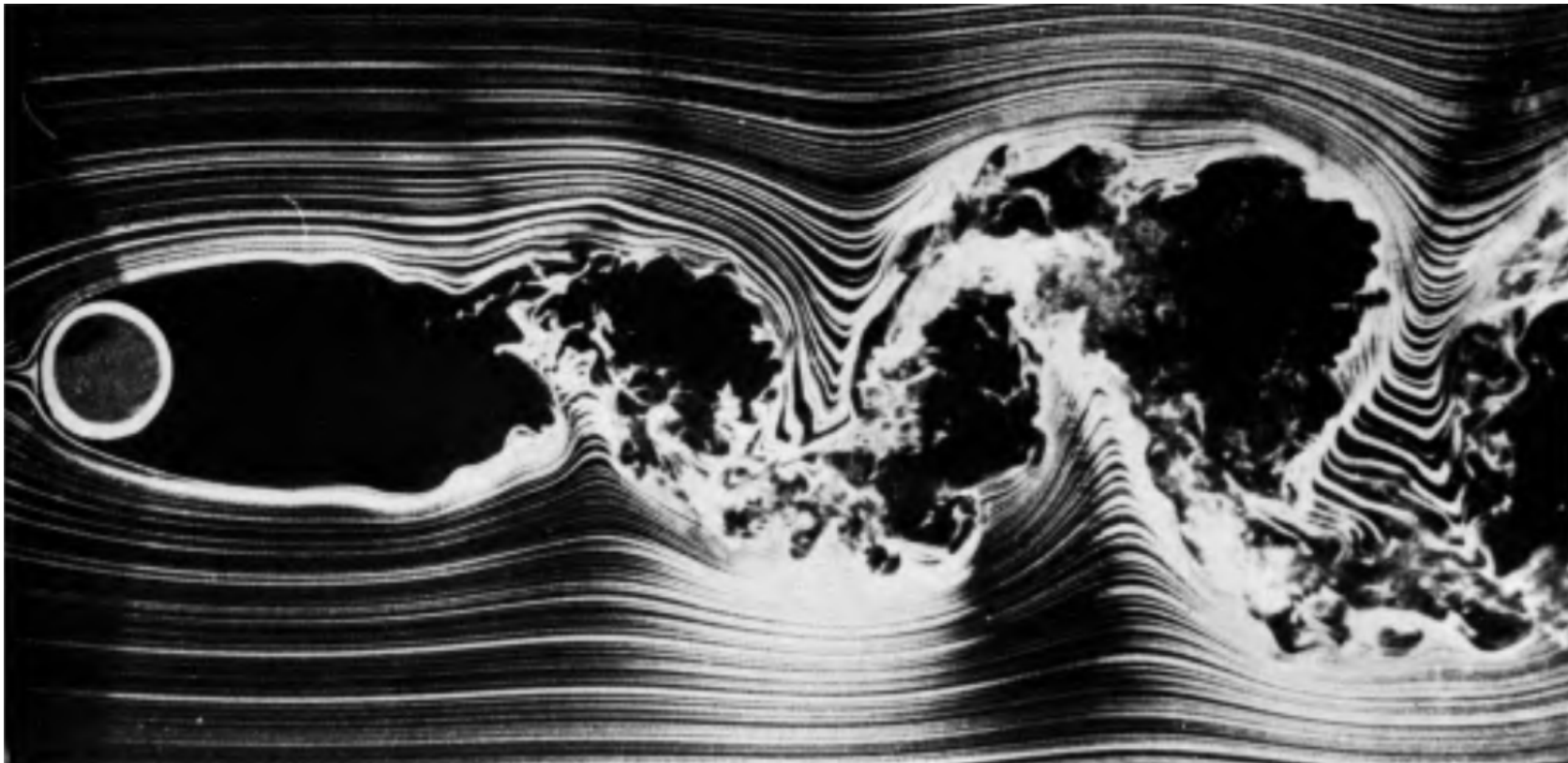


Шум от задней кромки крыла при наличии закрылка

# Когерентные структуры

Турбулентность возникает на фоне упорядоченного движения (дорожка Кармана)

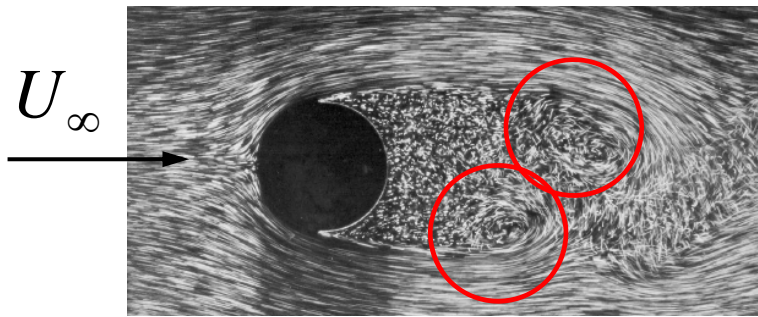
- Крупные, относительно упорядоченные структуры называются **когерентными**
  - Характерны для большинства турбулентных течений



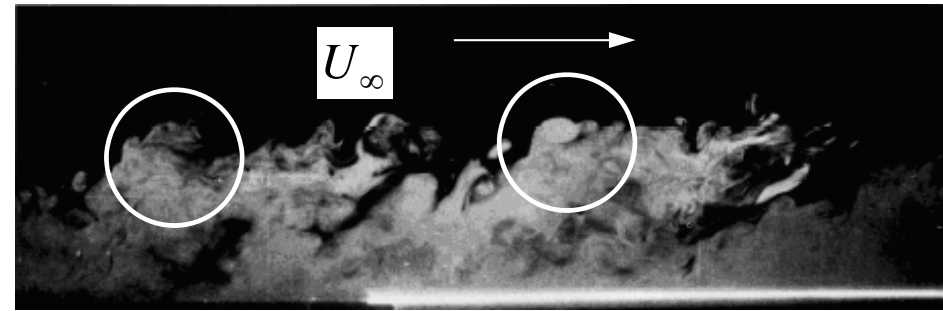
Обтекание круглого цилиндра при числе Рейнольдса  $10^4$



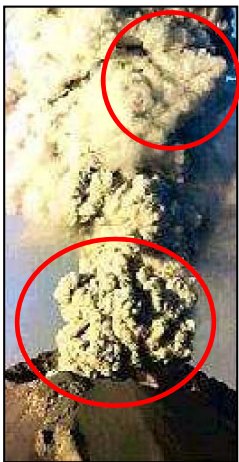
# Разнообразие турбулентных течений



Обтекание цилиндра



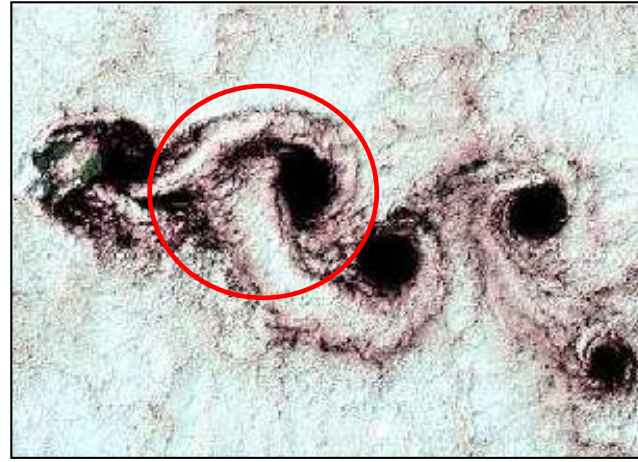
Пограничный слой на плоской стенке



Извержение  
вулкана



Затопленная  
струя



След за островом в океане



Галактические облака

Все эти турбулентные течения имеют общие свойства

- Трехмерный нестационарный характер
- Наличие в потоке как *крупных (когерентных)*, так и *очень мелких хаотичных структур*

# Определение турбулентности

Все известные определения турбулентности отражают лишь часть свойств этого исключительно сложного физического явления

*Турбулентность – это трехмерное нестационарное движение жидкости, в котором вследствие растяжения вихрей создается непрерывное распределение хаотических пульсаций параметров потока (скорости, давления и т.д.) в интервале длин волн от минимальных, определяемых вязкими силами, до максимальных, определяемых граничными условиями течения*

*П.Брэдшоу*

Турбулентность - это неупорядоченное движение, которое в общем случае возникает в жидкостях, газообразных или капельных средах, когда они обтекают непроницаемые поверхности или же когда соседние друг с другом потоки одной и той же жидкости следуют рядом или проникают один в другой.

*Т. Карман*

Турбулентное движение жидкости предполагает наличие неупорядоченного течения, в котором различные величины претерпевают хаотическое изменение во времени и по пространственным координатам и при этом могут быть выделены статистически точные их осредненные значения.

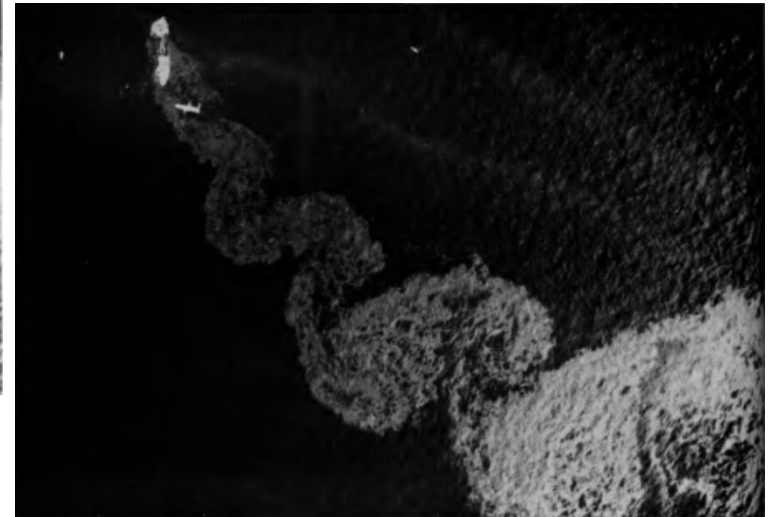
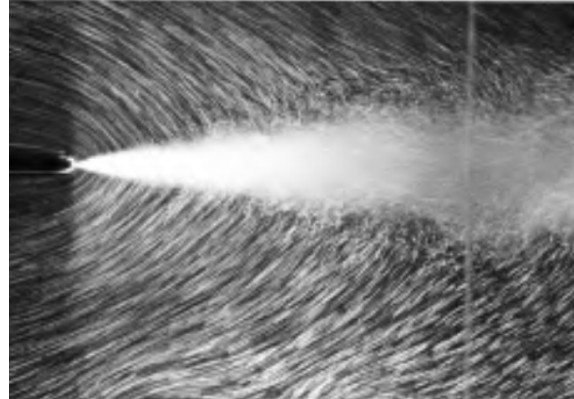
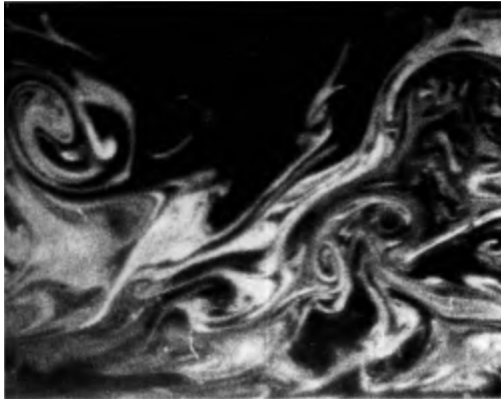
*И. Хинце*

# Признаки турбулентных течений

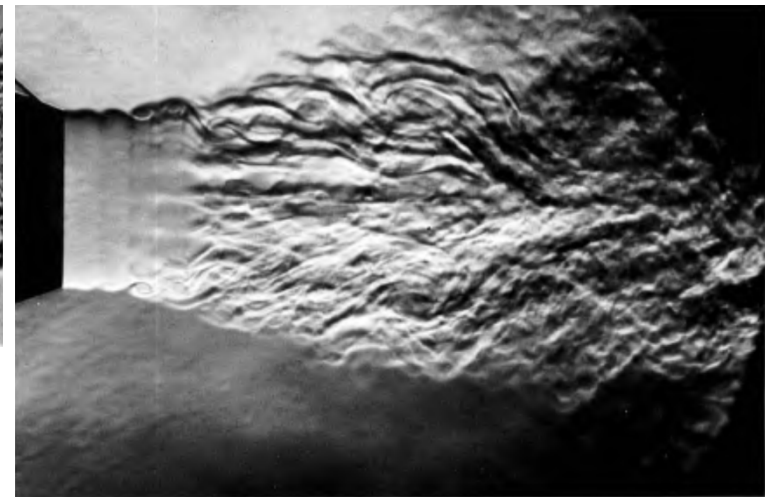
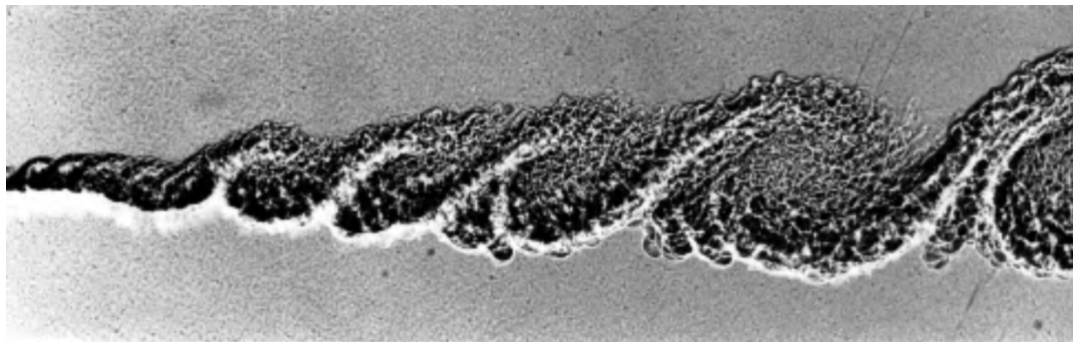
- Нерегулярность
  - Турбулентное течение нерегулярно, случайно и хаотично
- Диффузионность
  - В турбулентном течении диффузия выше чем в ламинарном
- Высокое число Рейнольдса
  - Турбулентность встречается при высоких числах Рейнольдса
- Трехмерность
  - Турбулентность всегда трехмерна
- Диссипативность
  - Энергия наиболее мелких вихрей диссипирует в тепло
- Неразрывность
  - Размер наиболее мелких вихрей намного больше длины свободного пробега
    - ✓ Эти вихри могут быть рассмотрены в рамках механики сплошной среды

# Как определить характер течения?

## I. Визуально



Примеси (дым, туман, частицы)

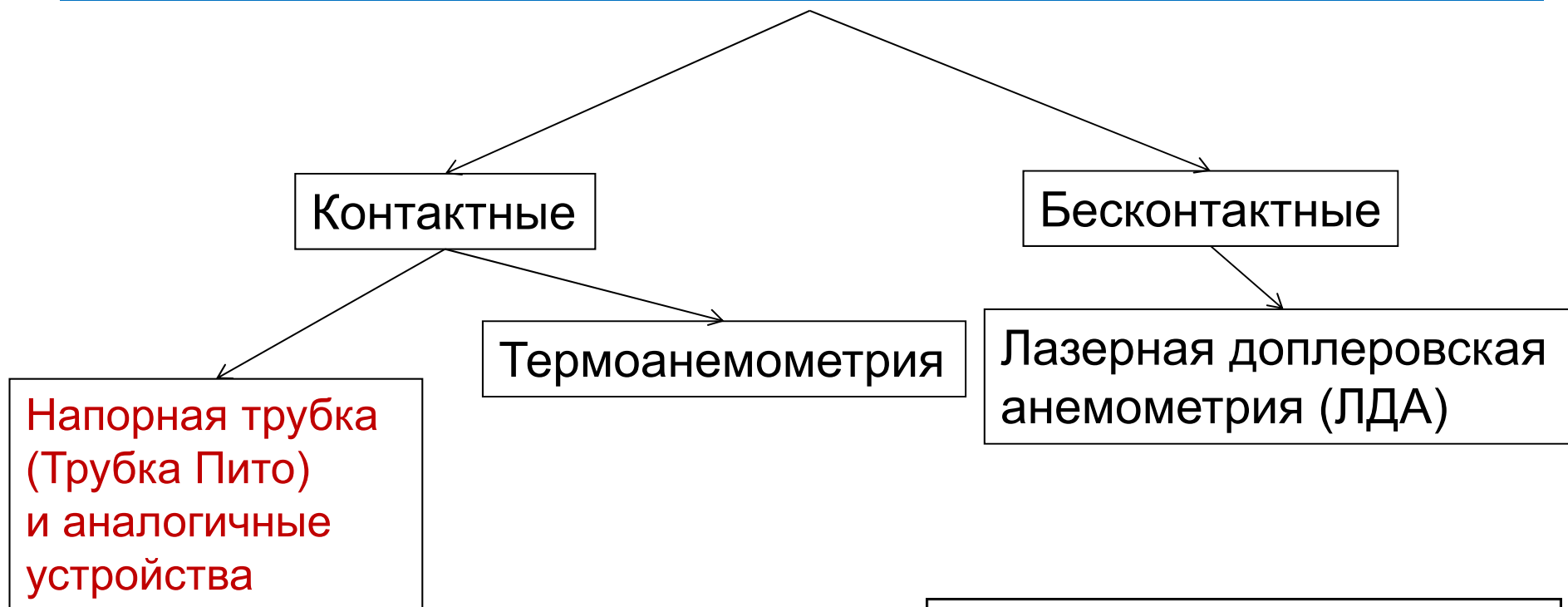


Теневые фотографии

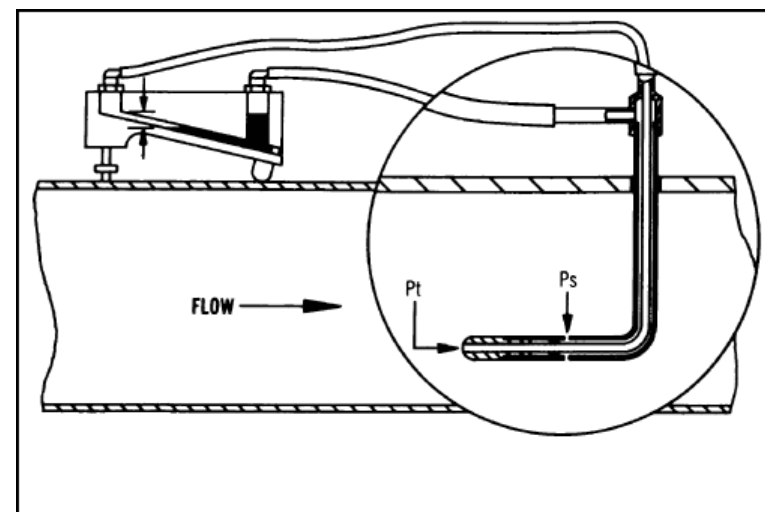
## II. При помощи измерений



# Основные способы измерения скорости потока

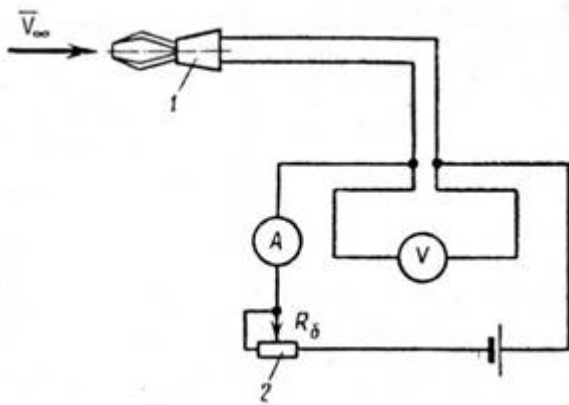


- Вносит существенное возмущение в поток
- Обладает большим временем релаксации
  - Не пригодна для измерений скорости в турбулентном потоке



# Термоанемометрия

Принцип действия основан на зависимости между скоростью потока и теплоотдачей проволоочки, помещенной в поток и нагретой электрическим током.



## Схема работы термоанемометра

- Измерительный элемент (металлическая нить диаметром 0,005-0,15 мм) нагревается током
- Температура нити зависит от скорости ее охлаждения потоком
- Сопротивление нити зависит от температуры и влияет на силу тока в цепи



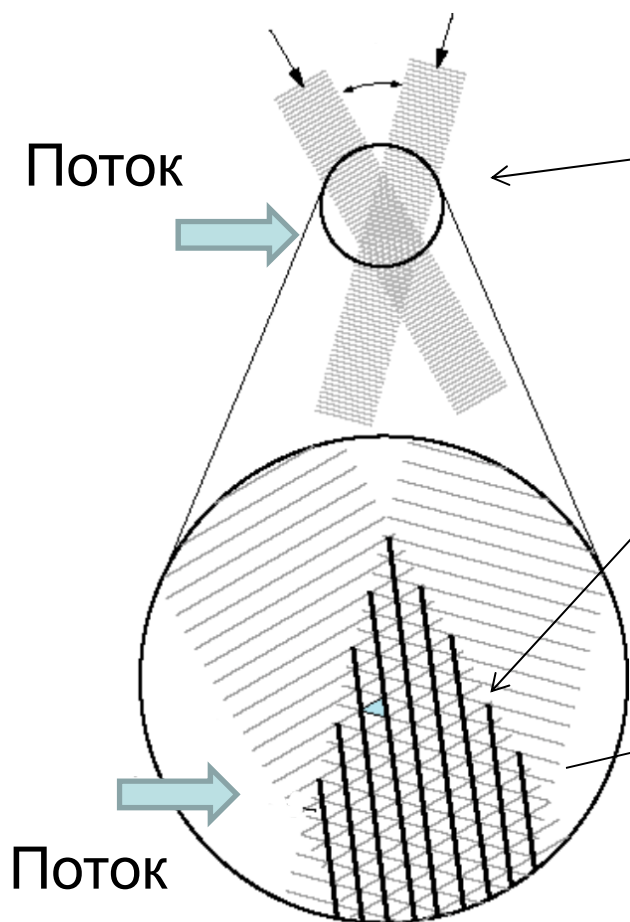
Можно связать силу электрического тока и скорость потока

Благодаря малой инерционности, высокой чувствительности, точности и компактности термоанемометр широко применяется при изучении турбулентных течений

# Лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА)

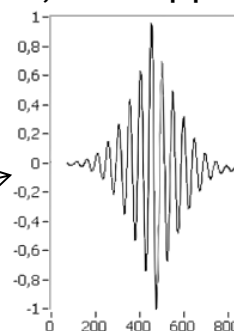
Оптический метод измерения направления и скорости взвешенных в потоке частиц

- Размер частиц ~0.5-20 микрон



## Схема работы ЛДА

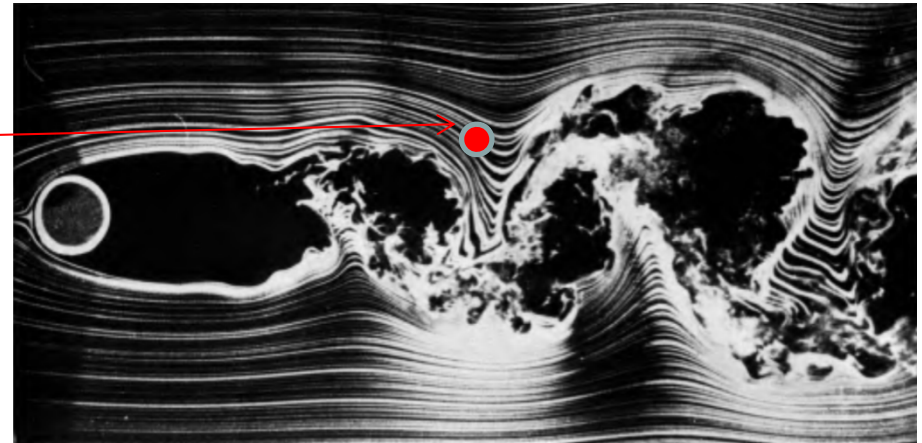
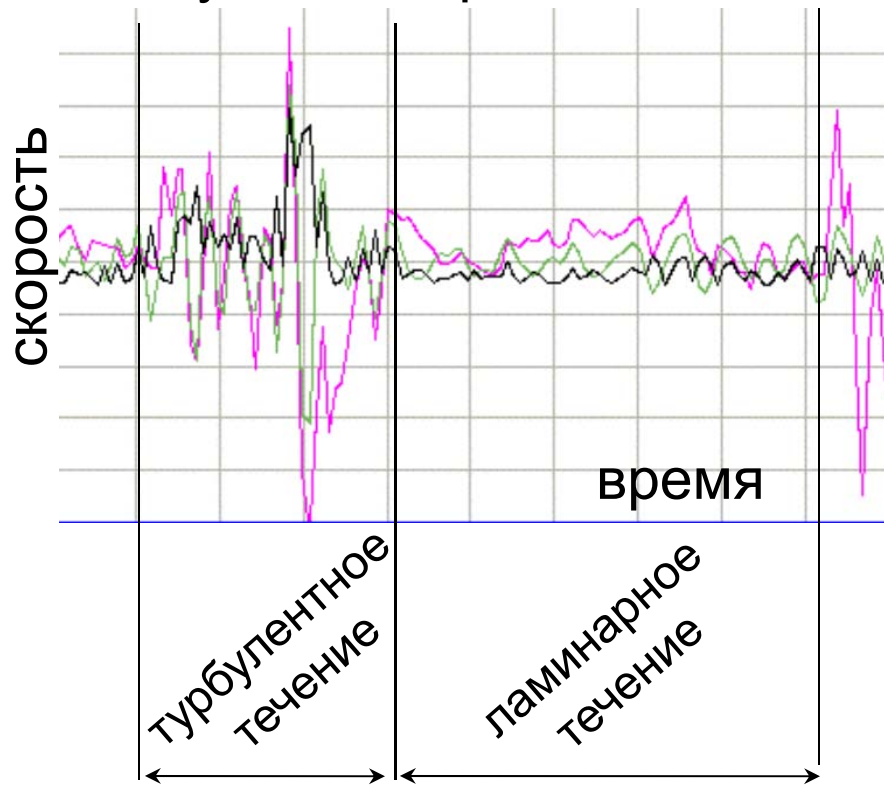
- два когерентных лазерных пучка пересекаются друг с другом в интересующей области потока
- в месте их пересечения образуется семейство прямых интерференционных полос
- Свет, отраженный пересекающимися полосы частицами, попадает на фотодетектор



Измеряя доплеровский сдвиг частоты рассеянного света, можно определить скорость движения частиц (которая равна скорости потока)

# Переमेжаемость

Если провести измерения в точке потока за цилиндром то получится примерно следующая картина



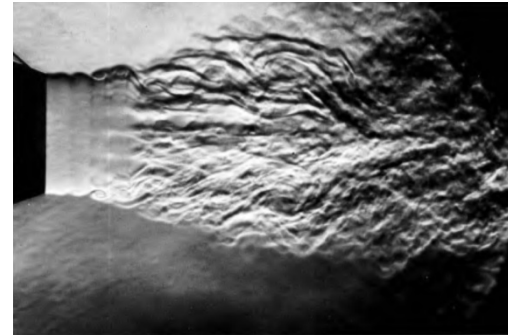
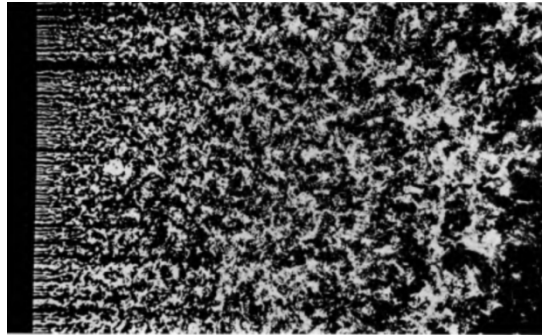
Явление чередования ламинарной и турбулентной форм движения называется перемежаемостью

Величина  $\gamma = \frac{t_1}{t_1 + t_2}$  называется коэффициентом перемежаемости



# Понятие средней величины и пульсации

- Турбулентные структуры существуют на фоне «основного» движения
  - Например, однородного потока или струи



- Это «основное» движение можно выделить путем осреднения
  - Поэтому его обычно называют осредненным движением
- Определение осредненного движения зависит от выбранного **способа осреднения:**

по времени

по пространству

по ансамблю

по фазе

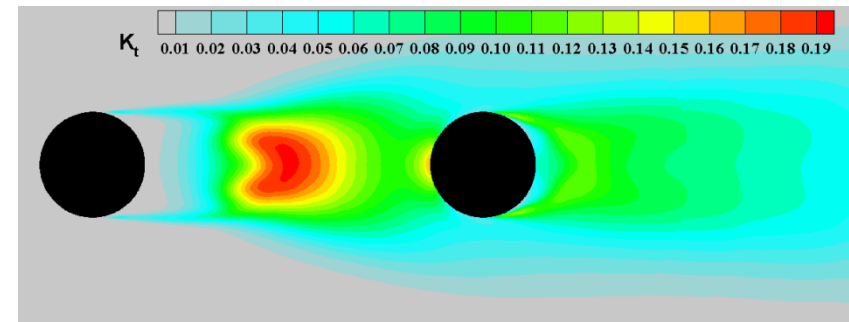
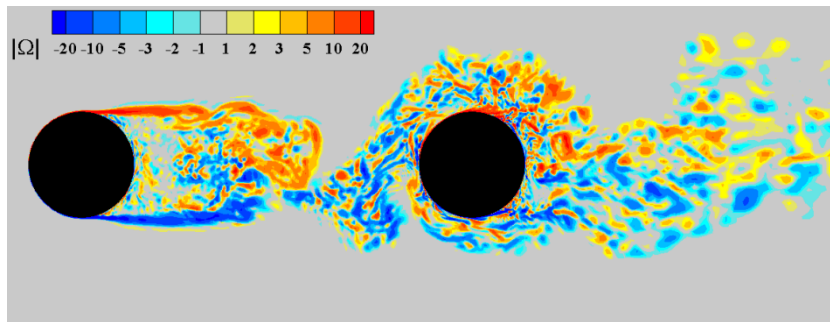
- Таким образом турбулентное течение можно разделить осредненную (детерминированную) и пульсационную составляющие

$$u \cong \bar{u} + u'$$

- Турбулентные течения, у которых осредненная составляющая не зависит от времени, называют стационарными

# Оценка интенсивности турбулентности

- Для оценки интенсивности пульсаций используют дисперсию  $\overline{u'^2}$
- Важными понятиями, используемыми на практике являются
  - кинетическая энергия турбулентности 
$$K_t = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}{2}$$
  - и степень турбулентности потока 
$$Tu = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{u}}$$



Мгновенная картина завихренности при обтекании тандема цилиндров

и кинетическая энергия турбулентности

- Завихренность  $|\Omega| = \sqrt{\text{rot}(\vec{V}) \cdot \text{rot}(\vec{V})}$  часто используется для визуализации турбулентных течений

# Различие между ламинарным и турбулентным потоками

В турбулентном потоке имеют место хаотические флуктуации (пульсации) основных газодинамических переменных: давления, температуры, плотности, скорости и т.д.



Пульсации (в первую очередь скорости) обеспечивают дополнительный перенос импульса, энергии и т.д.

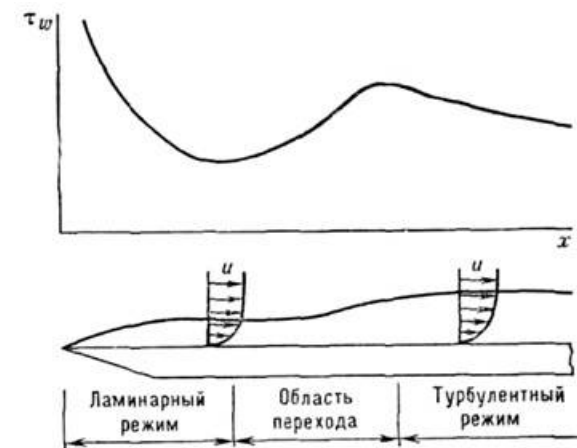
- Этот перенос намного превосходит молекулярный перенос



Происходит существенное изменение всех основных характеристик течения



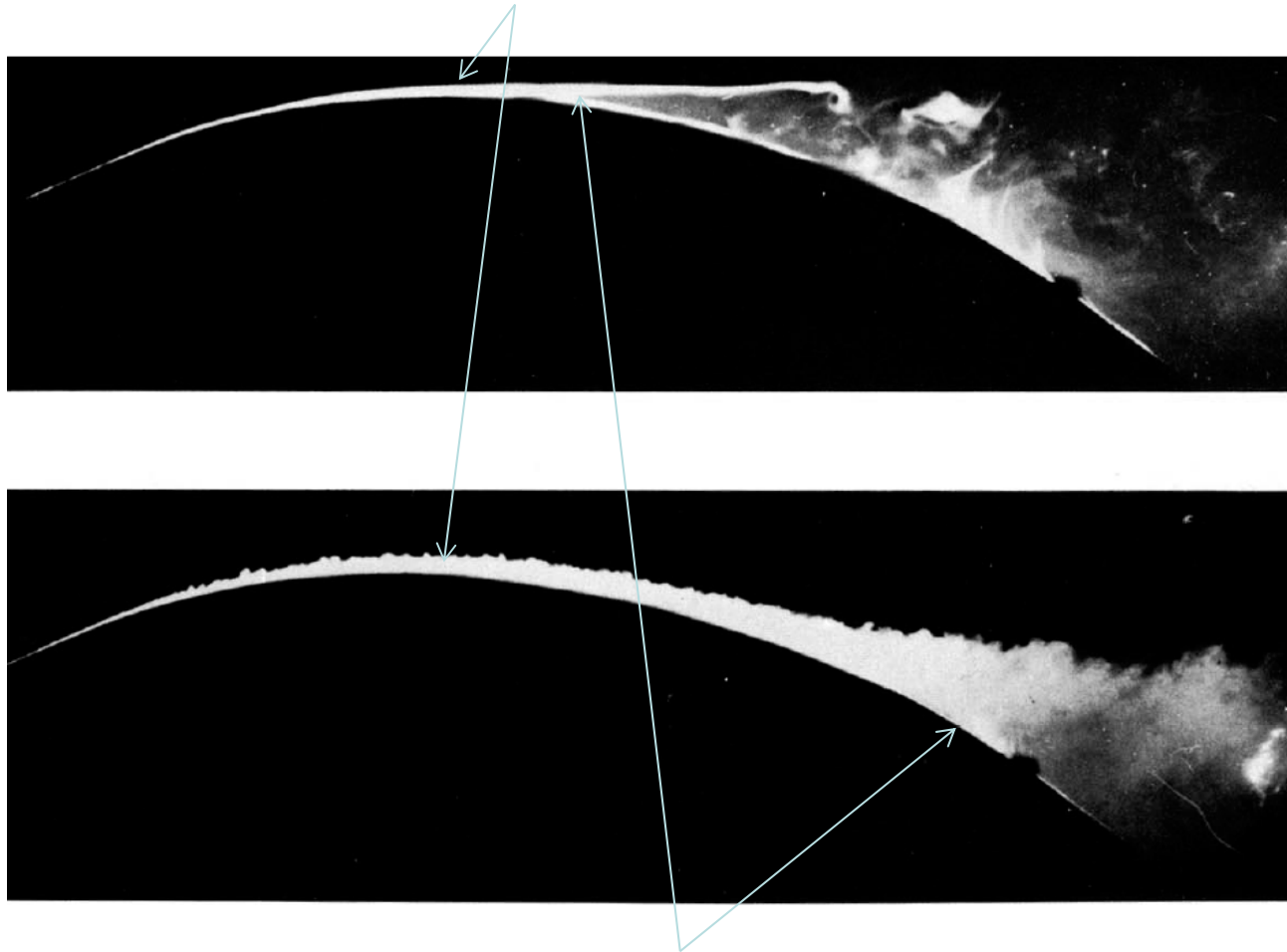
При расчете нельзя игнорировать влияние турбулентности



Напряжение трения на стенке в пограничном слое

# Сравнение ламинарного и турбулентного пограничных слоев

- Турбулентный пограничный слой толще



- Ламинарный пограничный слой раньше отрывается



# Необходимость создания надежных методов расчета турбулентных течений

- Большинство течений, с которыми приходится иметь дело при решении практических задач, являются турбулентными (числа Рейнольдса достаточно высоки)
- Высокие требования к точности расчета
  - внешняя аэродинамика (самолет и его элементы)
  - турбомашиностроение (турбинные лопатки)
  - кораблестроение (судно, винт)
  - автомобилестроение



Необходимы надежные методы расчета турбулентных течений

# Резюме

- Некоторые течения носят турбулентный характер – в них присутствуют разномасштабные турбулентные «вихри»
- Эти вихри приводят к дополнительному переносу импульса и энергии, который обычно намного интенсивнее молекулярного переноса
- Турбулентный перенос значительно изменяет свойства течения, поэтому его необходимо учитывать при решении конкретных задач
- Большинство практических задач являются турбулентными, для достижения высокой точности при их расчете требуется высокая точность моделирования турбулентности