

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)

Лекция 7

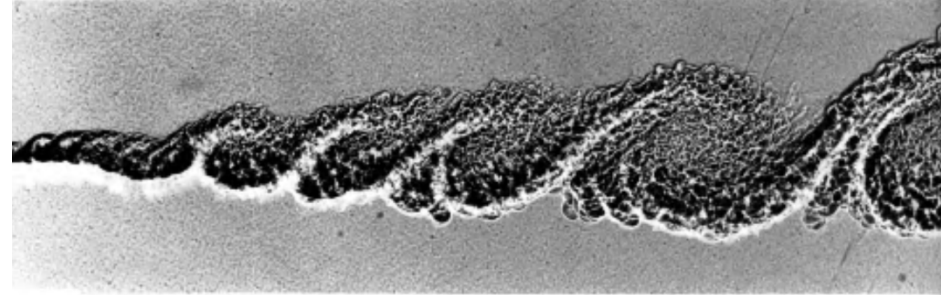
Свободные сдвиговые течения

Гарбарук Андрей Викторович (agarbaruk@mail.ru)
2023

Свободные сдвиговые течения

- Сдвиговые течения, в которых отсутствует влияние стенок на турбулентность

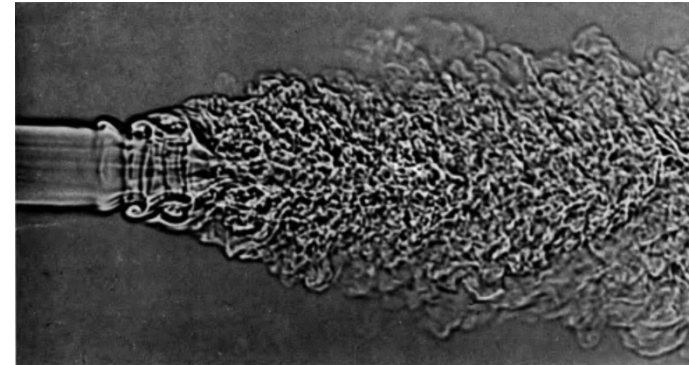
- Слой смешения



- Затопленная струя

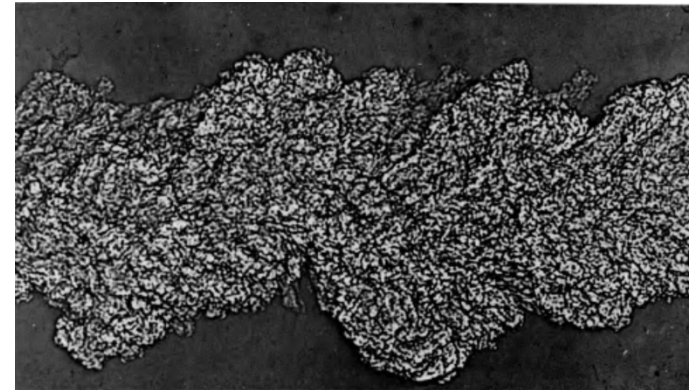
- ✓ Плоская

- ✓ Осесимметричная



- Дальний след за телом

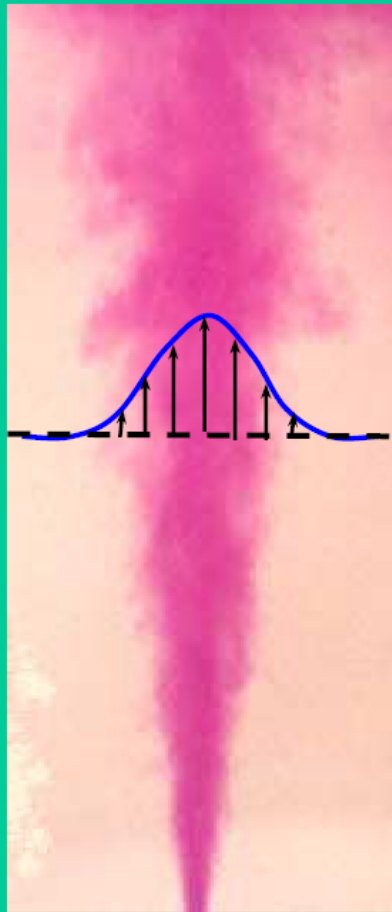
- ✓ Обычно рассматривают плоский след



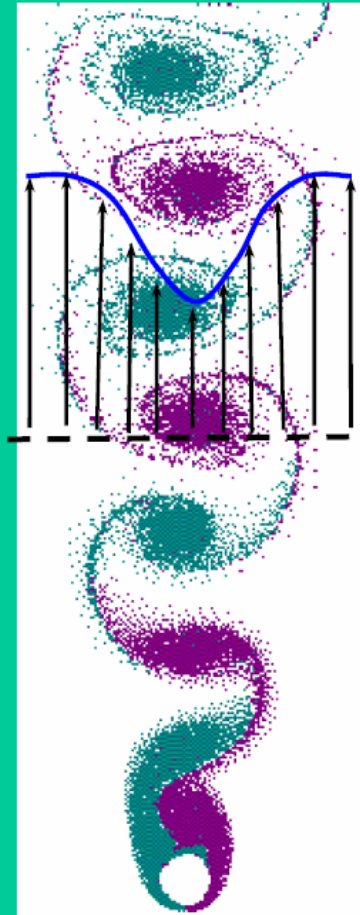
- Эти течения детально изучены в эксперименте

Свободные сдвиговые течения

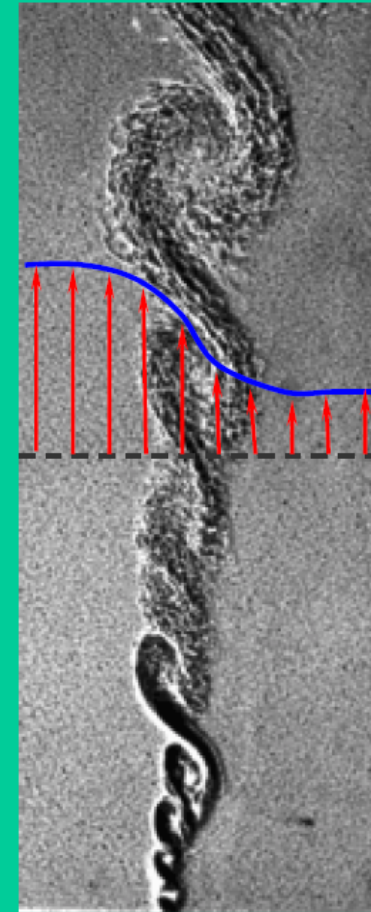
Можно пренебречь влиянием вверх по потоку



Затопленная
струя



След
за телом



Слой
смешения

Типичные профили осредненного течения

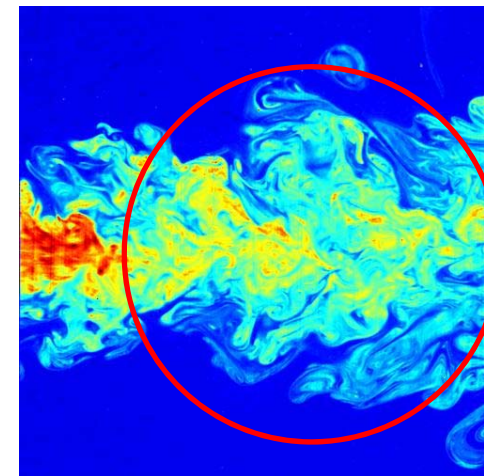
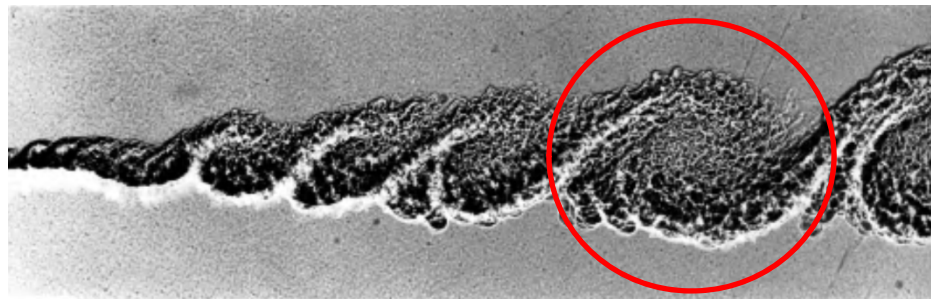
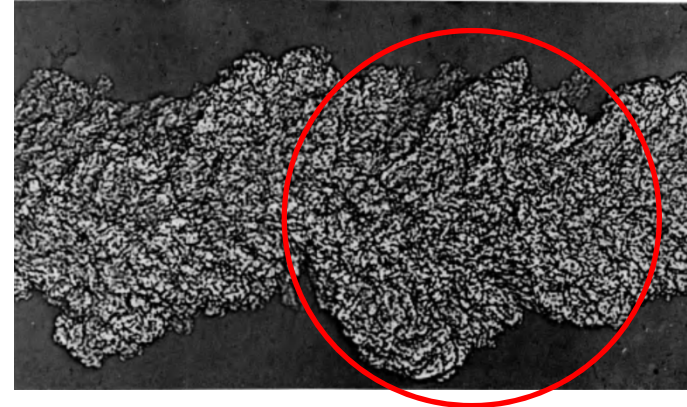
Свободные сдвиговые течения

- В случае ламинарного течения свободные сдвиговые течения имеют автомодельное решение (см. *Лойцянский, МЖГ*).
- При сравнительно высоких числах Рейнольдса турбулентная диффузия существенно превышает молекулярную
 - Это упрощает теоретическое рассмотрение данных течений
 - С некоторыми моделями турбулентности существует автомодельное решение
 - ✓ Формула Прандля
 - ✓ $k-\omega$ модель
 - Полученные автомодельные решения хорошо совпадают с экспериментальными данными
 - ✓ При высоком числе Рейнольдса

Двойная структура течения

- Наиболее крупные структуры оказываются упорядоченными (когерентными)

- Сравнимы по размеру с масштабом течения
 - ✓ Вовлекают невозмущенные (ламинарные) пятна из внешнего потока
 - Перемежаемость



Когерентные структуры в дальнем следе, струе и слое смешения

- На фоне когерентных структур развивается мелкомасштабная турбулентность

Когерентные структуры

- Являются упорядоченными
- Несут существенную долю энергии турбулентности (до 80%)
- Различаются по структуре для различных типов свободных сдвиговых течений
 - Даже для течений одного типа могут зависеть от предыстории потока

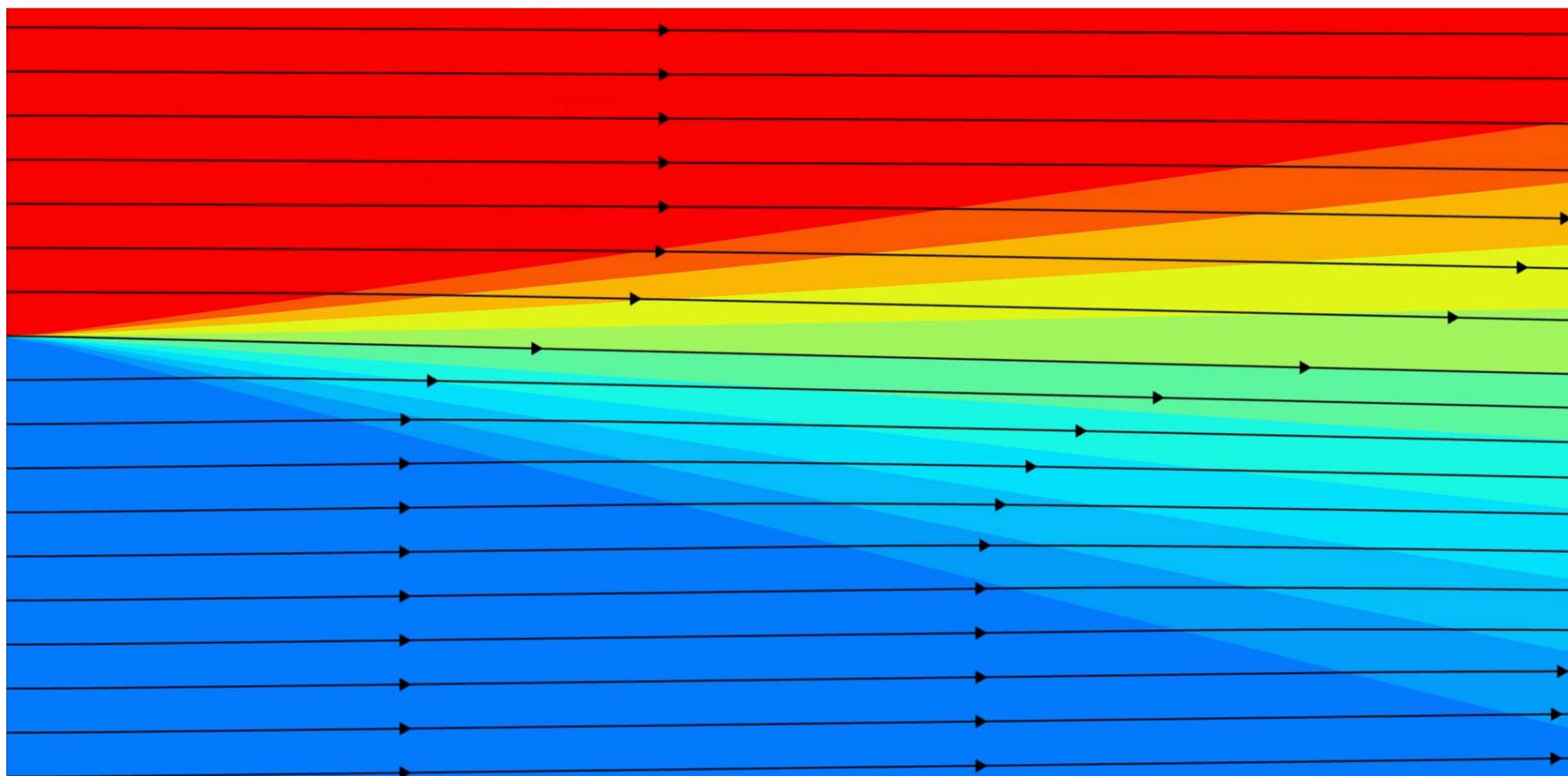


- При моделировании свободных сдвиговых течений методом RANS возникают трудности
 - При переходе от течения к течению необходима перестройка констант полуэмпирических моделей турбулентности
 - ✓ Большинство моделей не в состоянии хорошо предсказать свойства всех свободных сдвиговых течений
 - ✓ Для получения более универсальных моделей вводят специальные поправки (например: модель Секундова ν_t -92)

Слой смешения

- Получается при взаимодействии двух потоков, движущихся в одном направлении с разными скоростями

MIXING LAYER

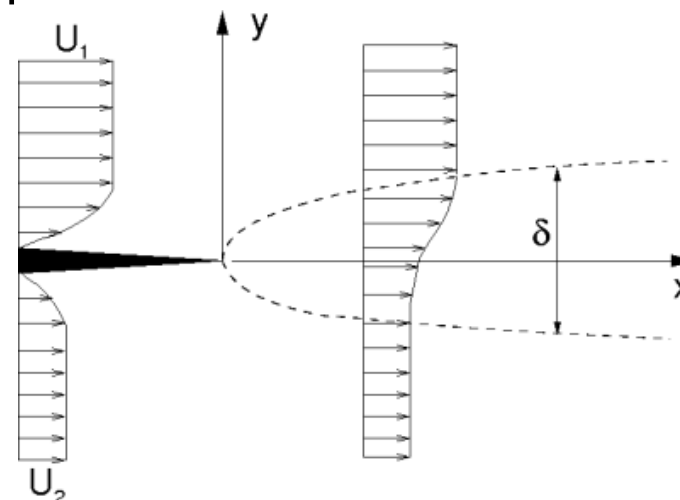


Слой смешения

- В эксперименте начальный участок слоя смешения зависит от толщины и формы профиля скорости пограничных слоев

- Масштабы скорости

- $\Delta U = U_2 - U_1$
- $U_{0.5} = 0.5 \cdot (U_2 + U_1)$



- Линейный масштаб – толщина

- Процентная толщина слоя смешения

- ✓ Скорость на краях асимптотически стремится к скорости внешнего потока
- ✓ Расстояние между точками, в которых скорость отличается от скорости в соответствующем внешнем потоке на определенное количество процентов от разности скоростей внешних потоков – 1÷10%

- Интегральная толщина $\Theta = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(u - U_1)(U_2 - u)}{(U_2 - U_1)^2}$

- ✓ Толщина потери импульса

- ✓ Не зависит от произвольного выбора %

Толщина слоя смешения

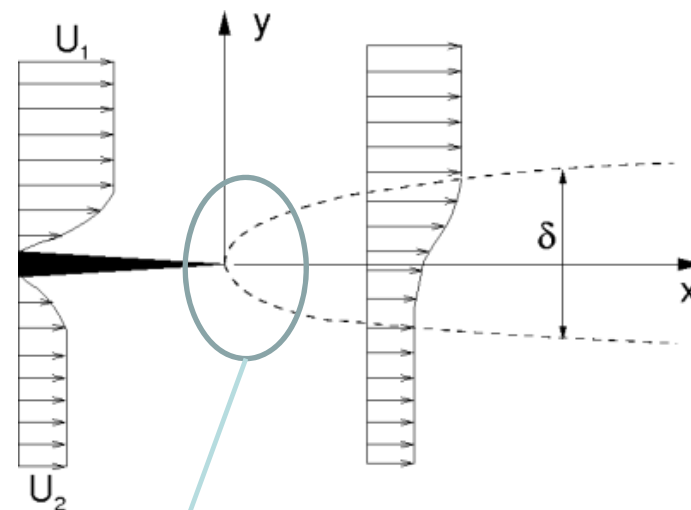
- Ламинарный слой смешения

- Параллельное течение

$$u = \frac{U_1 + U_2}{2} \left[1 + \frac{U_2 - U_1}{U_1 + U_2} \operatorname{th} \left(\frac{y}{2\Theta} \right) \right]$$

- Толщина растет $\sim x^{1/2}$

- ✓ При бесконечно малой начальной толщине



- Развитый турбулентный слой смешения

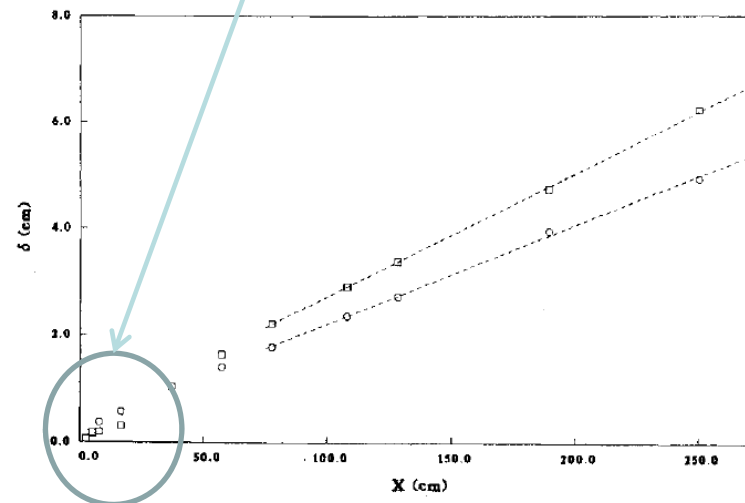
- Толщина растет линейно

- ✓ «Угол расширения» слоя смешения
- ✓ Коэффициент расширения (тангенс угла расширения)
 - Экспериментальное значение (для 10% ширины) $C_\delta \approx 0.115$

- «Нулевая» линия тока отклоняется в сторону меньшей скорости

- В реальных экспериментах в начале имеется нелинейный участок

- Влияние пограничных слоев



Автомодельность слоя смешения

- Эксперименты подтверждают автомодельность развитого турбулентного слоя смешения

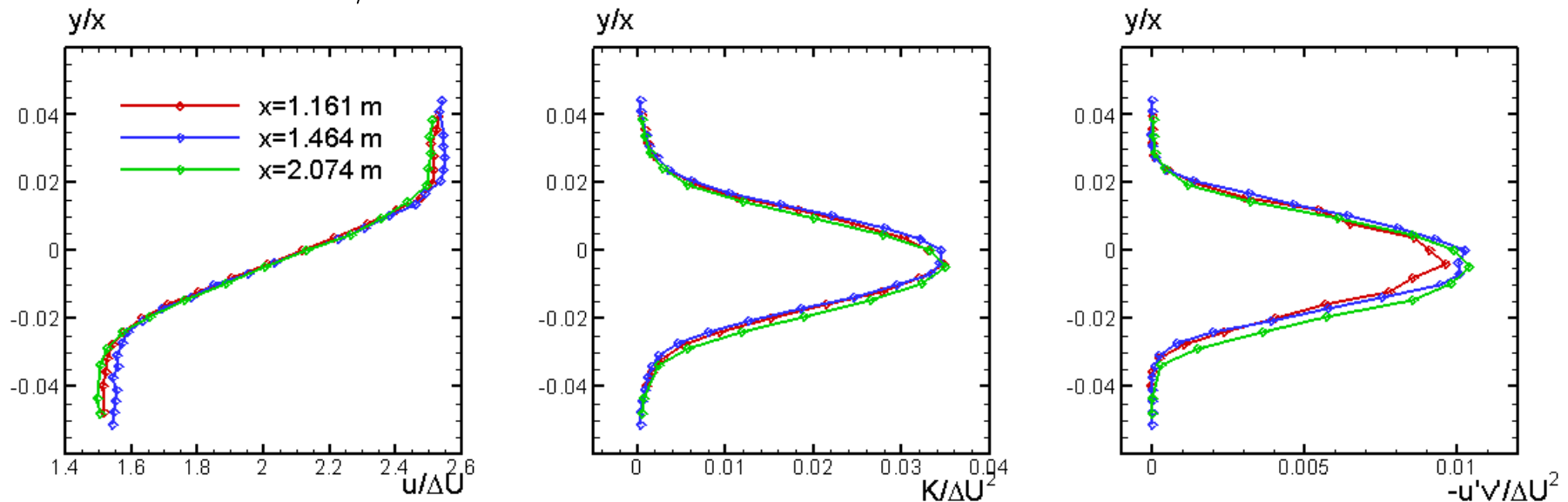
- Профиль скорости

- ✓ Может быть аппроксимирован

$$\frac{u - U_1}{U_2 - U_1} = \frac{1}{2} \left[1 + \left(1 + \frac{0.67}{ch(\xi)} \right) th(\xi) \right], \quad \xi = 0.25 \frac{y - y_{0.5}}{\Theta}, \quad u(y_{0.5}) = U_{0.5}$$

- Турбулентные характеристики

- ✓ $-\overline{u'v'}/K \approx 0.3$



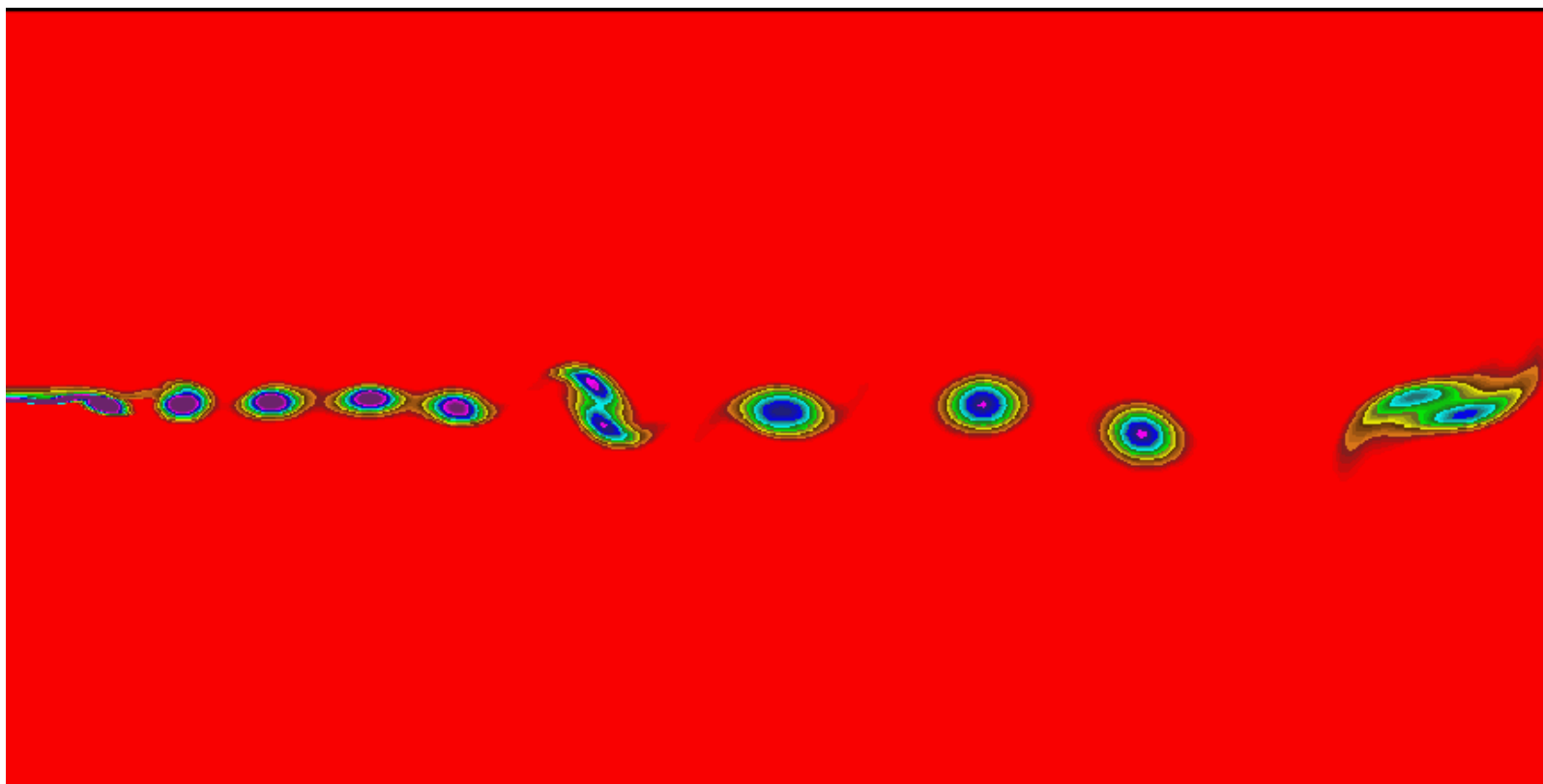
Экспериментальные профили скорости и турбулентных характеристик 10

Устойчивость слоя смешения

- Теория устойчивости
 - Абсолютно неустойчив в невязкой постановке
 - В вязкой постановке число $Re_\theta = \Theta U_{0.5} / \nu$ потери устойчивости около 10
- Естественная неустойчивость
 - Теория Рэлея
 - ✓ Совпадает с экспериментом
 - $St = f_m \Theta / U_{0.5} \approx 0.03$
 - $\lambda_m = U_{0.5} / f_m$
- Вынужденная неустойчивость
 - Внешние возмущения
 - Резонанс
 - ✓ Слой смешения над каверной
 - Отражение возмущений от стенок
 - Эмпирическая формула Росситэ (Rossiter)

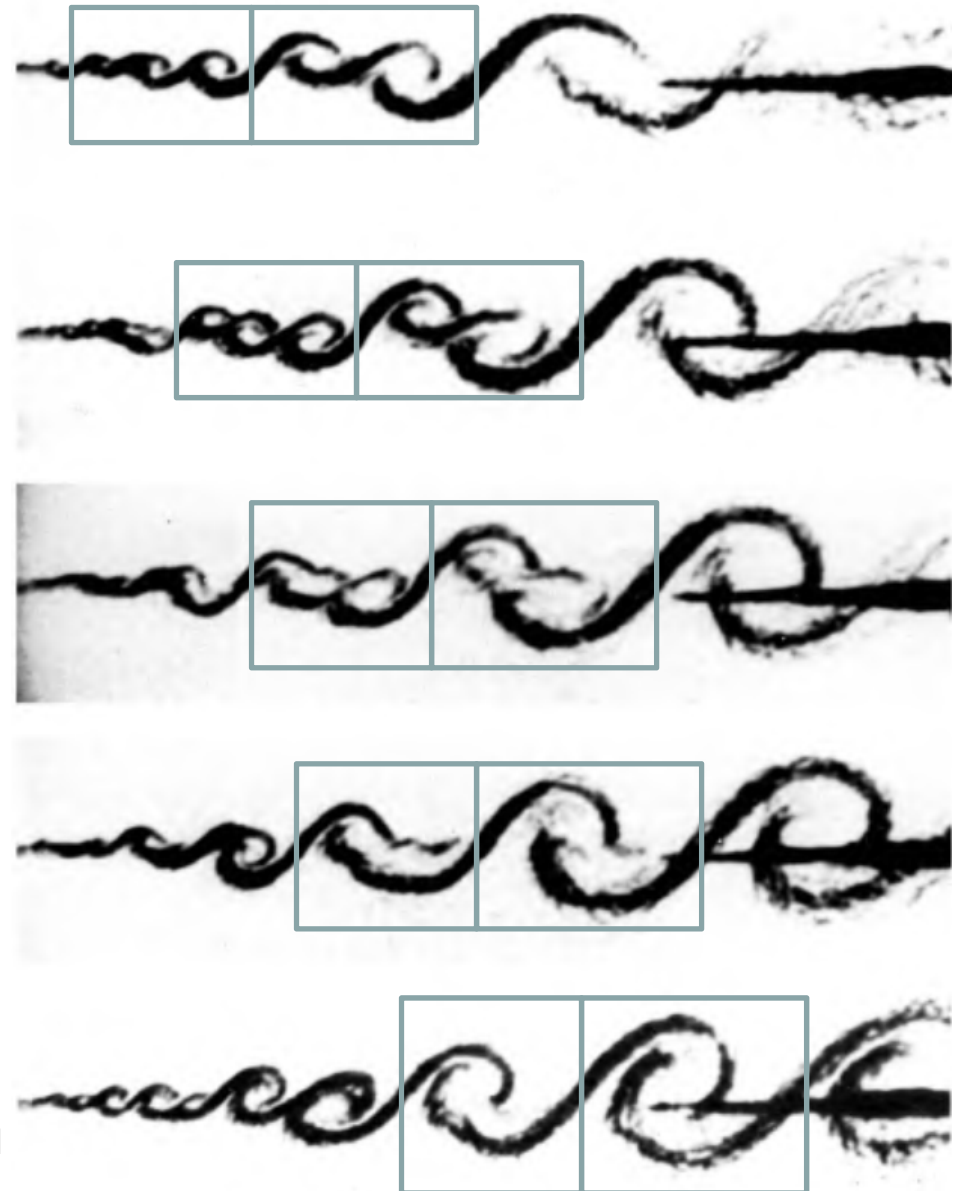
Сценарий развития возмущений

- Параллельные линии тока начинают периодически изгибаться (shedding)
- Сворачивание вихрей
 - Двумерные вихри (типа roller)
- Объединение вихрей



Объединение вихрей

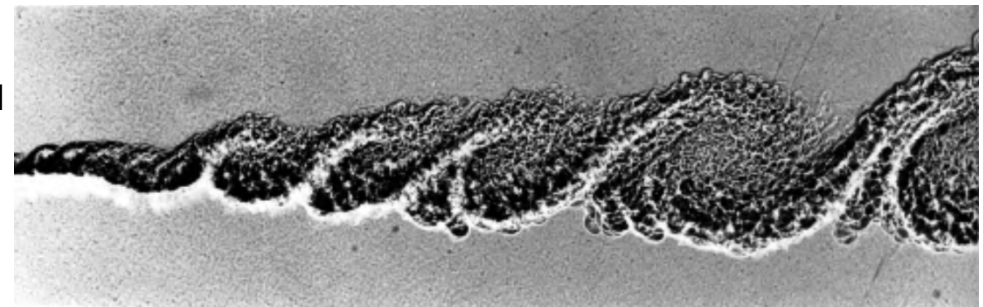
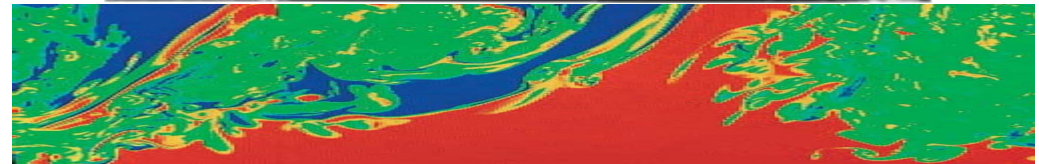
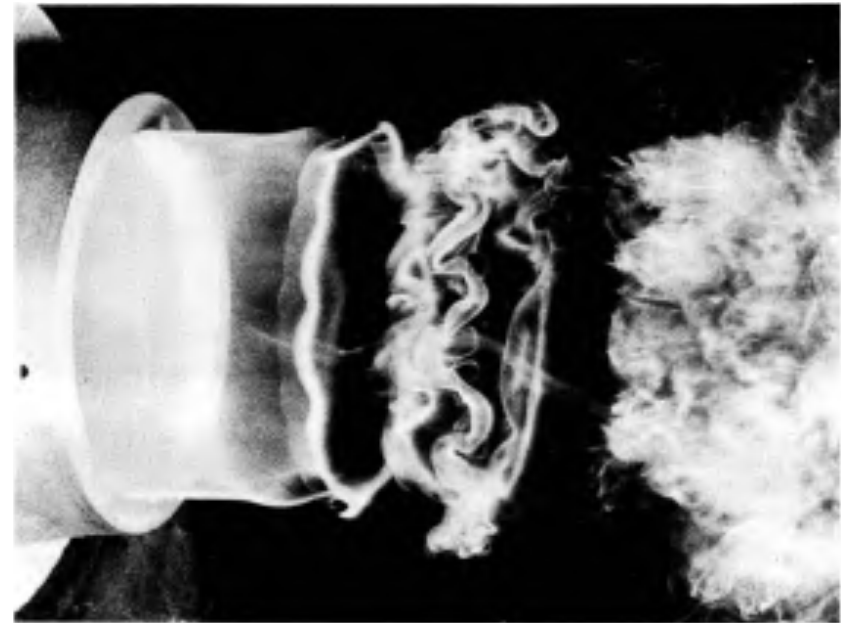
- Сценарий
 - Идущий впереди вихрь за счет своего вращения «выталкивает» следующий за ним в область более высоких скоростей
 - ✓ Сам опускается в сторону более низких.
 - Задний вихрь «догоняет» передний и они объединяются
 - Получившийся вихрь примерно в 2 раза превышает исходные
- Приводит к увеличению размера когерентных структур
 - «Обратный каскад» - передача энергии более крупным вихрям
 - ✓ Двумерный процесс
- Количество таких «спариваний» зависит от числа Рейнольдса
 - Процесс идет пока слой смешения не станет трехмерным



Переход к трехмерной турбулентности

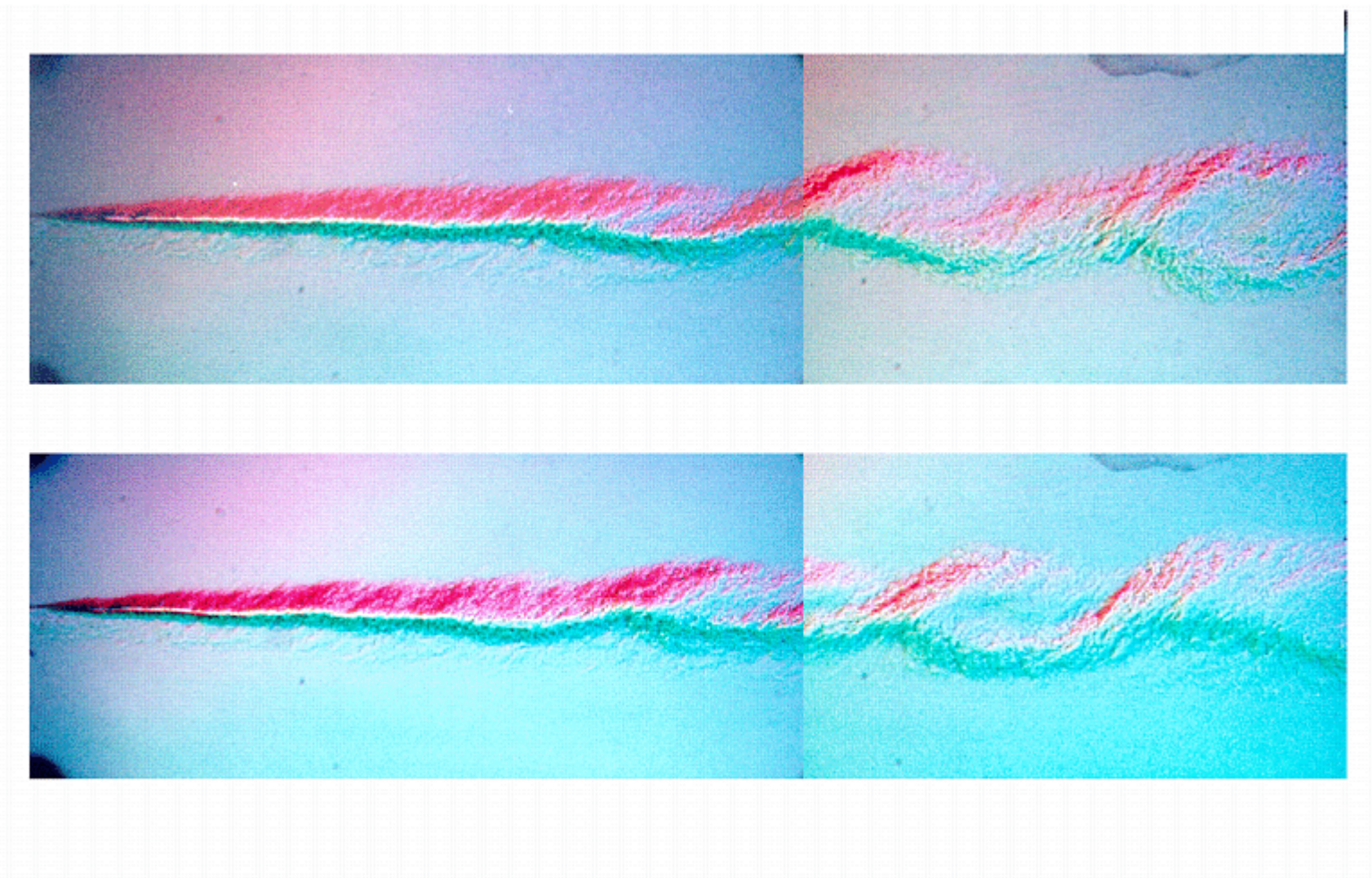
Происходит благодаря двум механизмам

- Двумерные вихри теряют устойчивость в третьем направлении
 - За счет попадания в области потока разной скорости они растягиваются
 - Превращаются в вихри типа braid (шнурок)
 - Появляются продольные вихри типа rib (ребро)
- Мелкомасштабный переход к турбулентности
 - Происходит в сдвиговом слое между двумя соседними вихрями
 - $3 \cdot 10^3 < Re_\theta < 5 \cdot 10^3$
 - Мелкомасштабная турбулентность «размывает» когерентные структуры

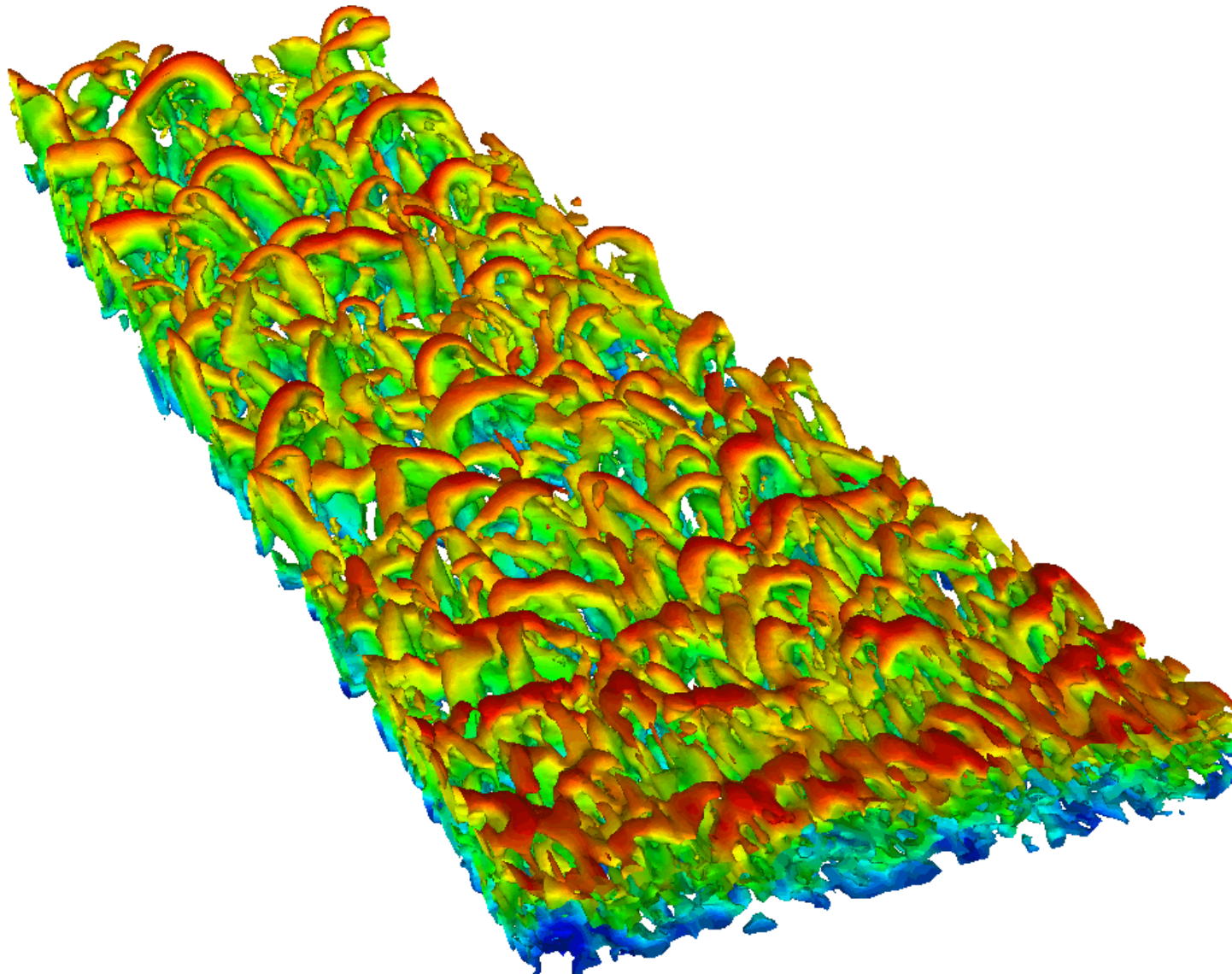


Вторичная неустойчивость

- Турбулентный слой смешения может оказаться неустойчивым
 - На фоне мелкомасштабной турбулентности появляются когерентные структуры



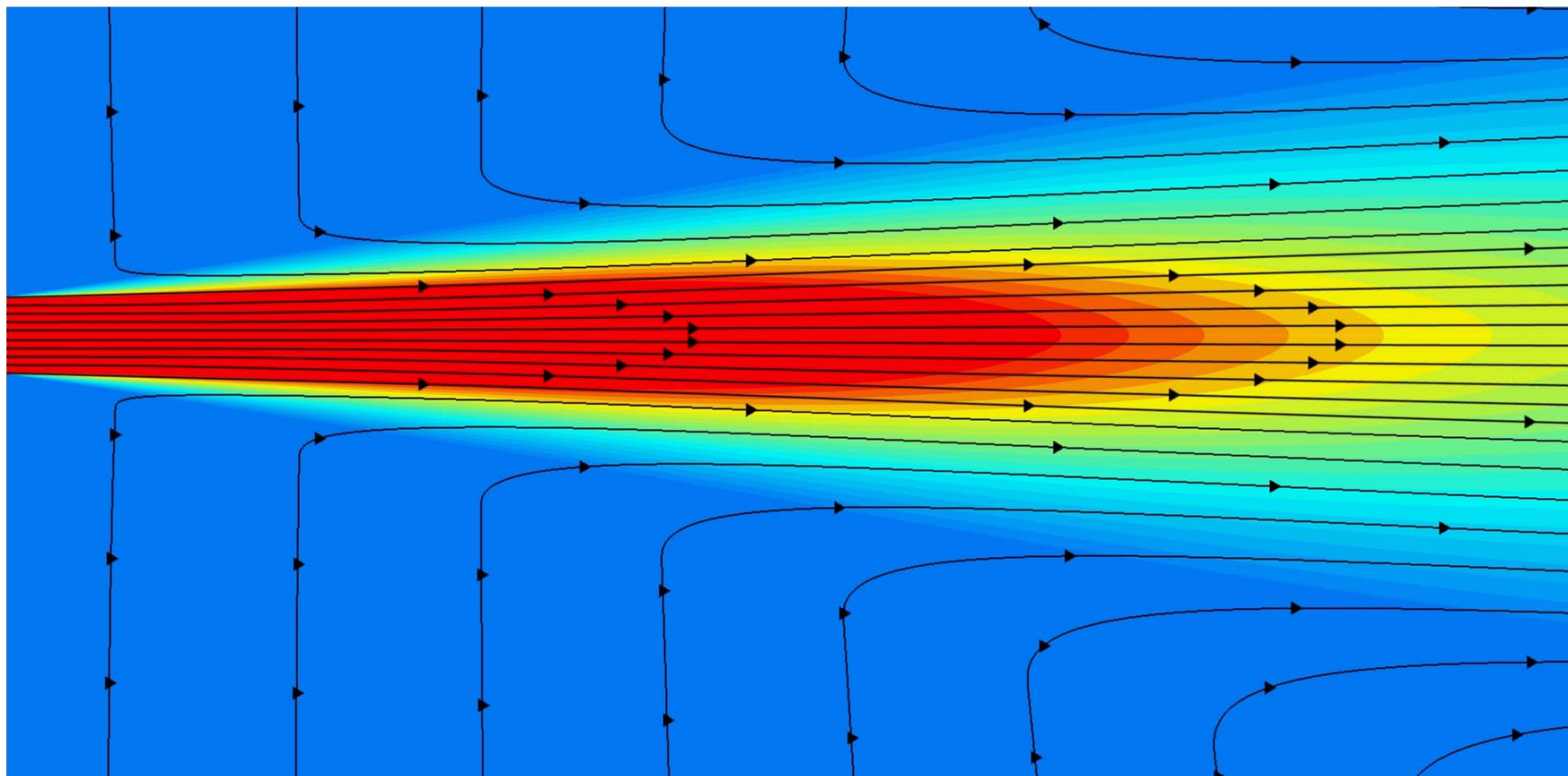
Турбулентные структуры в развитом слое смешения



Затопленная струя

Струя, вытекающая в ту же самую среду

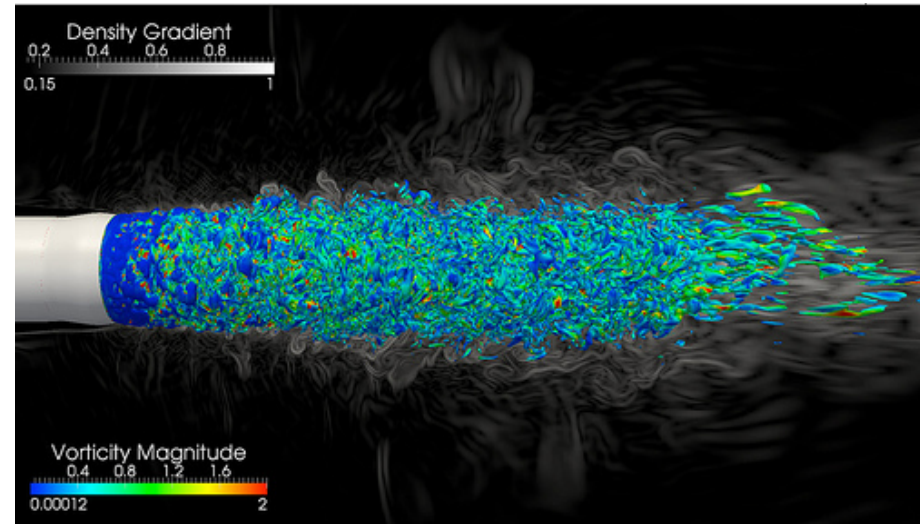
PLANE JET



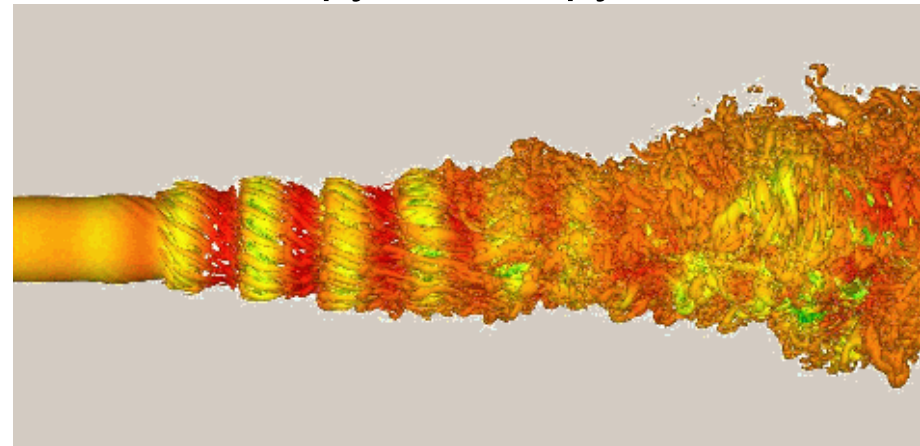
Примеры затопленных струй



Плоская струя (из узкой щели)



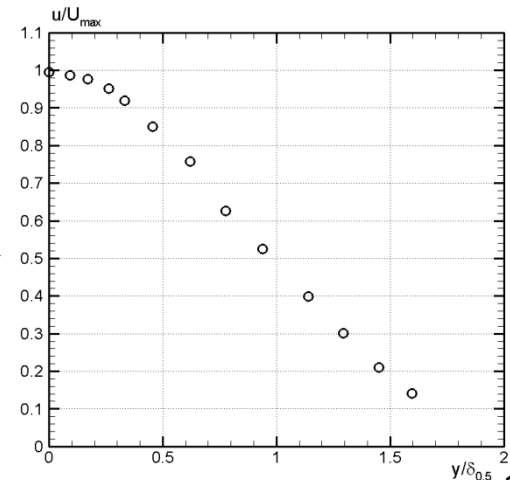
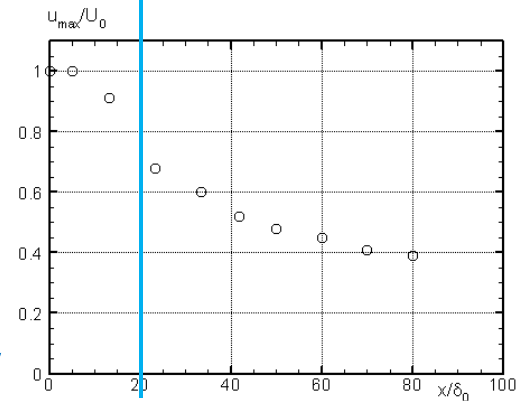
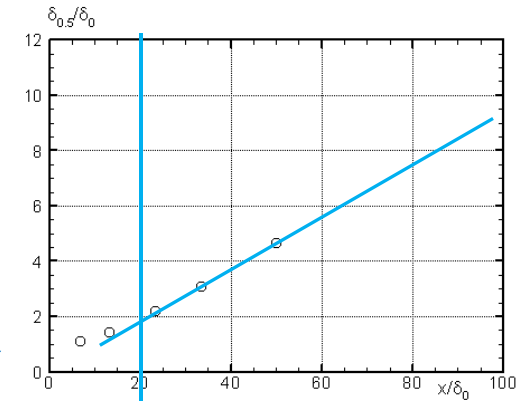
Круглая струя



Круглая закрученная струя

Плоская струя

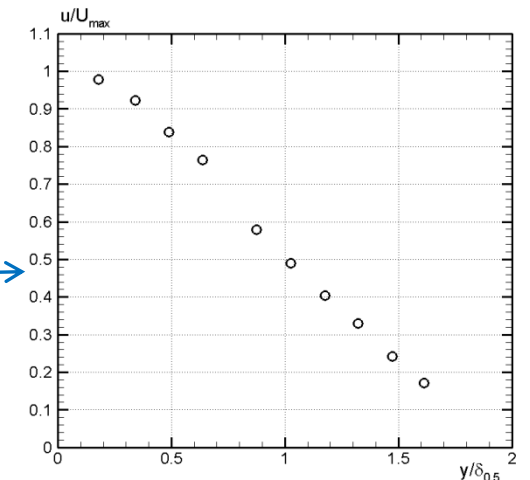
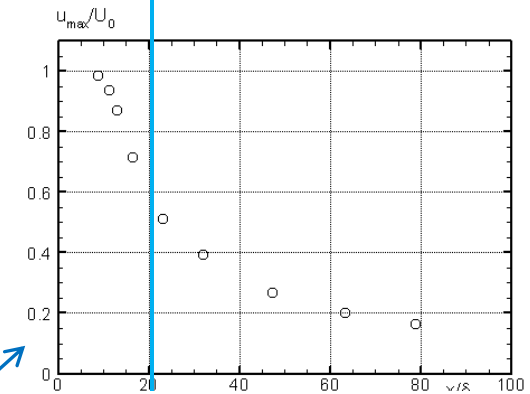
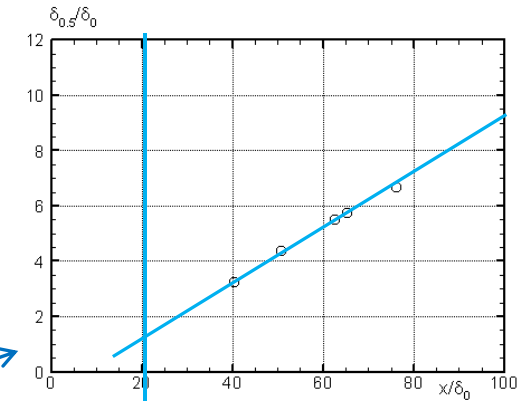
- Сохраняется импульс струи $I = \rho \int_{-\infty}^{\infty} u^2 \cdot dy$
- Наиболее простой является задача о струе, вытекающей из точечного источника
 - Эта струя является автомодельной
 - Ширина струи $\sim x$
 - ✓ «Угол расширения» струи (между осью x и точкой, в которой скорость равна половине скорости на оси струи - $r_{0.5}$)
 - ✓ Коэффициент расширения (тангенсу «угла расширения»)
 $C_\delta \approx 0.1 \div 0.11$
 - Максимальная скорость убывает $u_m \sim x^{-0.5}$



- Профиль скорости

Круглая струя

- Сохраняется импульс струи $I = 2\pi\rho \int_0^{\infty} ru^2 \cdot dr$
- Наиболее простой является задача о струе, вытекающей из точечного источника
 - Эта струя является автомодельной
 - Ширина струи $\sim x$
 - ✓ «Угол расширения» струи (между осью x и точкой, в которой скорость равна половине скорости на оси струи - $r_{0.5}$)
 - ✓ Коэффициент расширения (тангенсу «угла расширения»)
 - $C_{\delta} \approx 0.086 \div 0.09$
 - Максимальная скорость убывает $u_m \sim x^{-1/2}$



- Профиль скорости

$$\frac{u}{u_m} = \left(1 - \left(\frac{r}{2r_{0.5}} \right)^{1.5} \right)^2$$

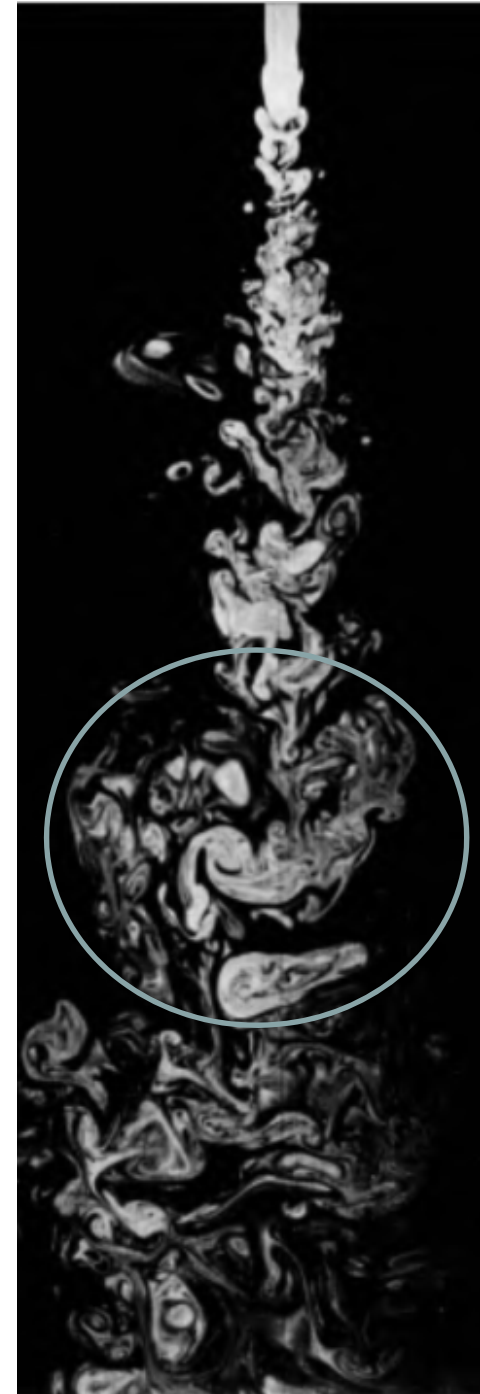
Эжекция

- Для струй характерно эжекционное потенциальное течение
 - Струя «втягивает» в себя жидкость или газ из окружающего пространства
 - ✓ Расход в струе возрастает



Двойная структура течения

- Для струй характерна двойная структура течения
 - Мелкомасштабное хаотическое турбулентное движение на фоне более упорядоченных когерентных структур
 - Менее ярко выражена, чем в слое смешения
- Втягивание низкотурбулентных объемов жидкости из внешнего потока
 - Перемежаемость



Струя из сопла конечного размера

Можно выделять три участка

1. Начальный участок

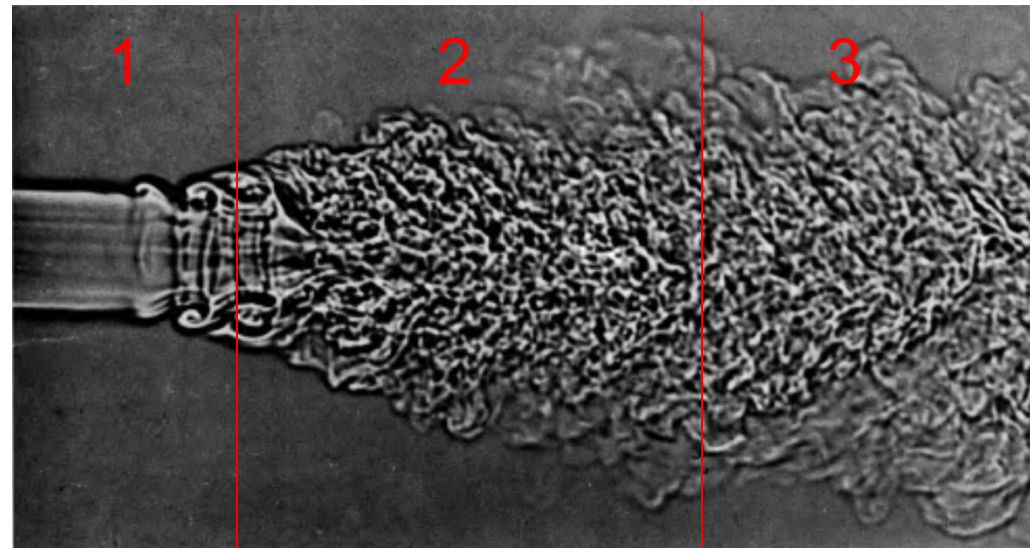
- Слои смешения развиваются независимо
- К концу начального участка слои смешения могут иметь разную структуру турбулентности
 - ✓ Зависит от числа Рейнольдса, диаметра сопла, особенностей течения в сопле, внешнего воздействия и т.д.
- В центре струи сохраняется ядро потока

2. Переходный участок

- Смыкание слоев смешения
- Разрушение когерентных структур слоев смешения
- Существенная турбулизация потока

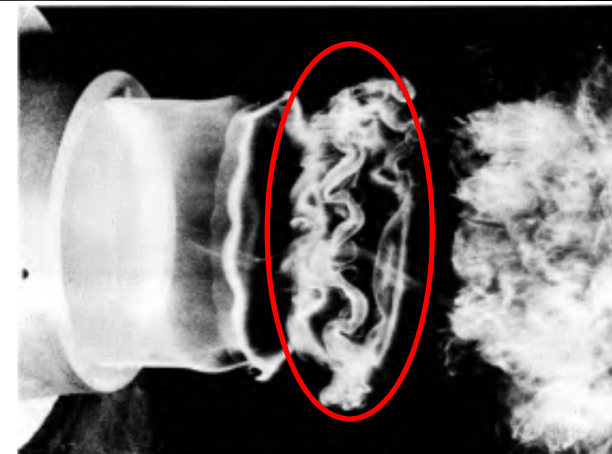
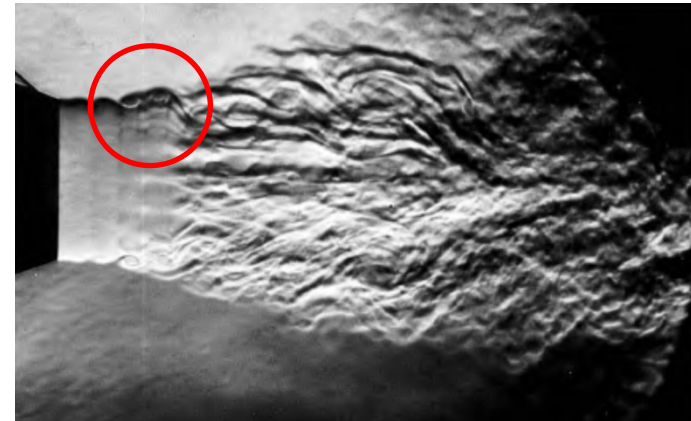
3. Основной участок струи

- С некоторого момента среднее течение - автомодельное
- Описывается теми же закономерностями, что и для струи из точечного источника

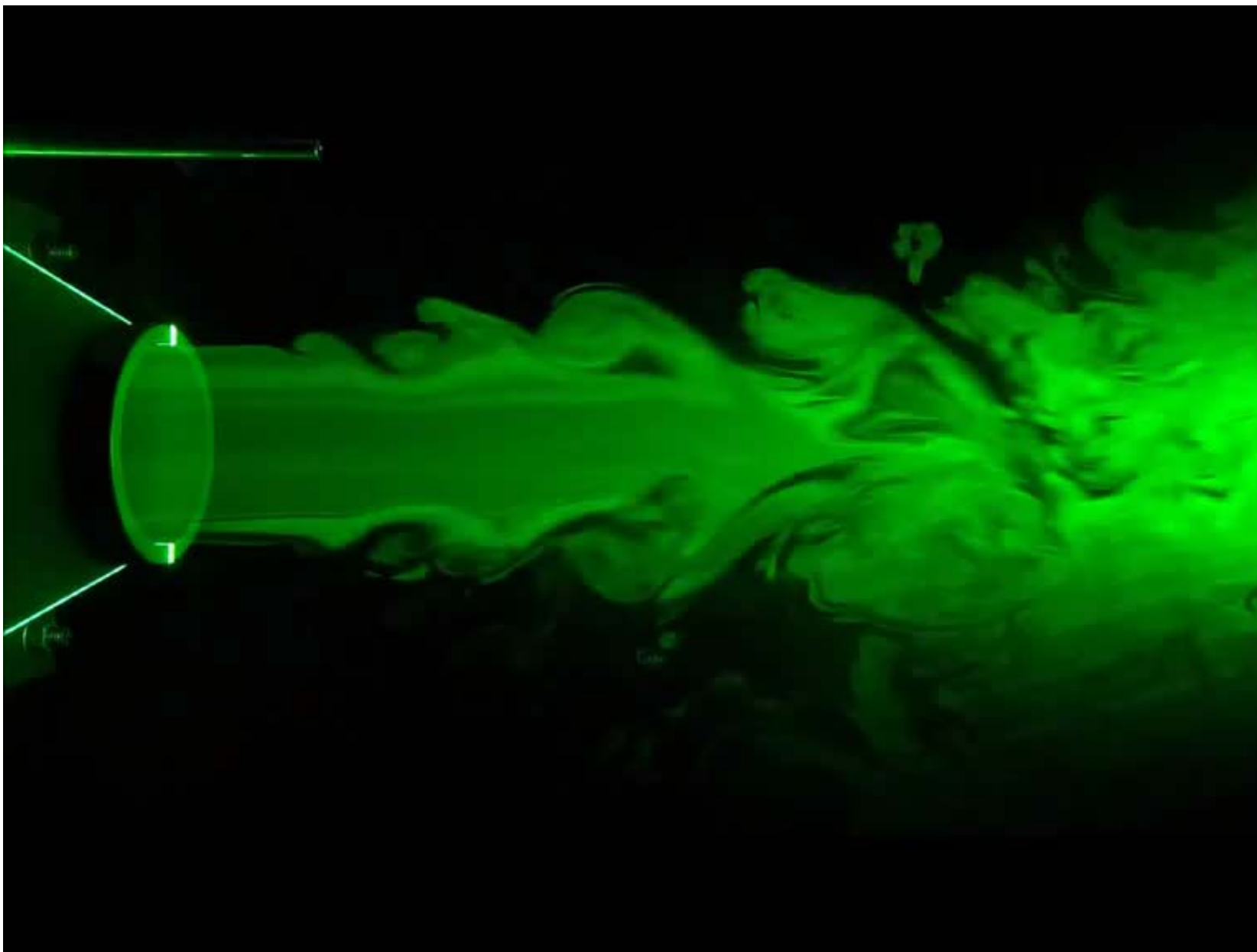


Неустойчивость затопленной струи

- На начальном участке струи – неустойчивость слоя смешения
- Различают три типа неустойчивости
 - Сворачивание слоя смешения
 - ✓ Продольные вихри типа roller
 - Объединение когерентных структур в слое смешения
 - ✓ Увеличение размера вихрей
 - Потеря вихрями типа roller осевой (пространственной) устойчивости
 - ✓ Трехмерная турбулентность
- В осесимметричном случае неустойчивость выше, чем в плоском

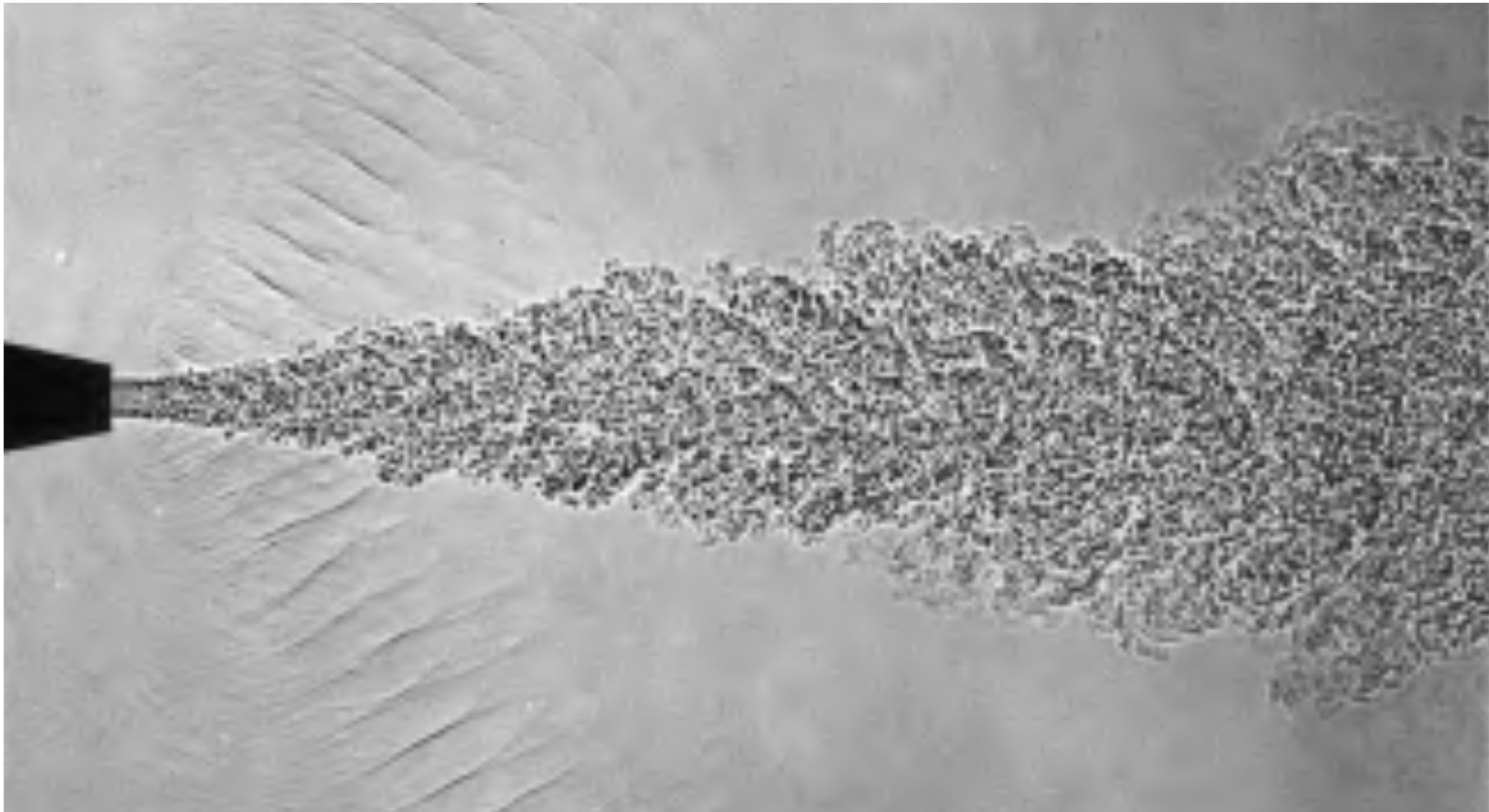


Начальный участок струи



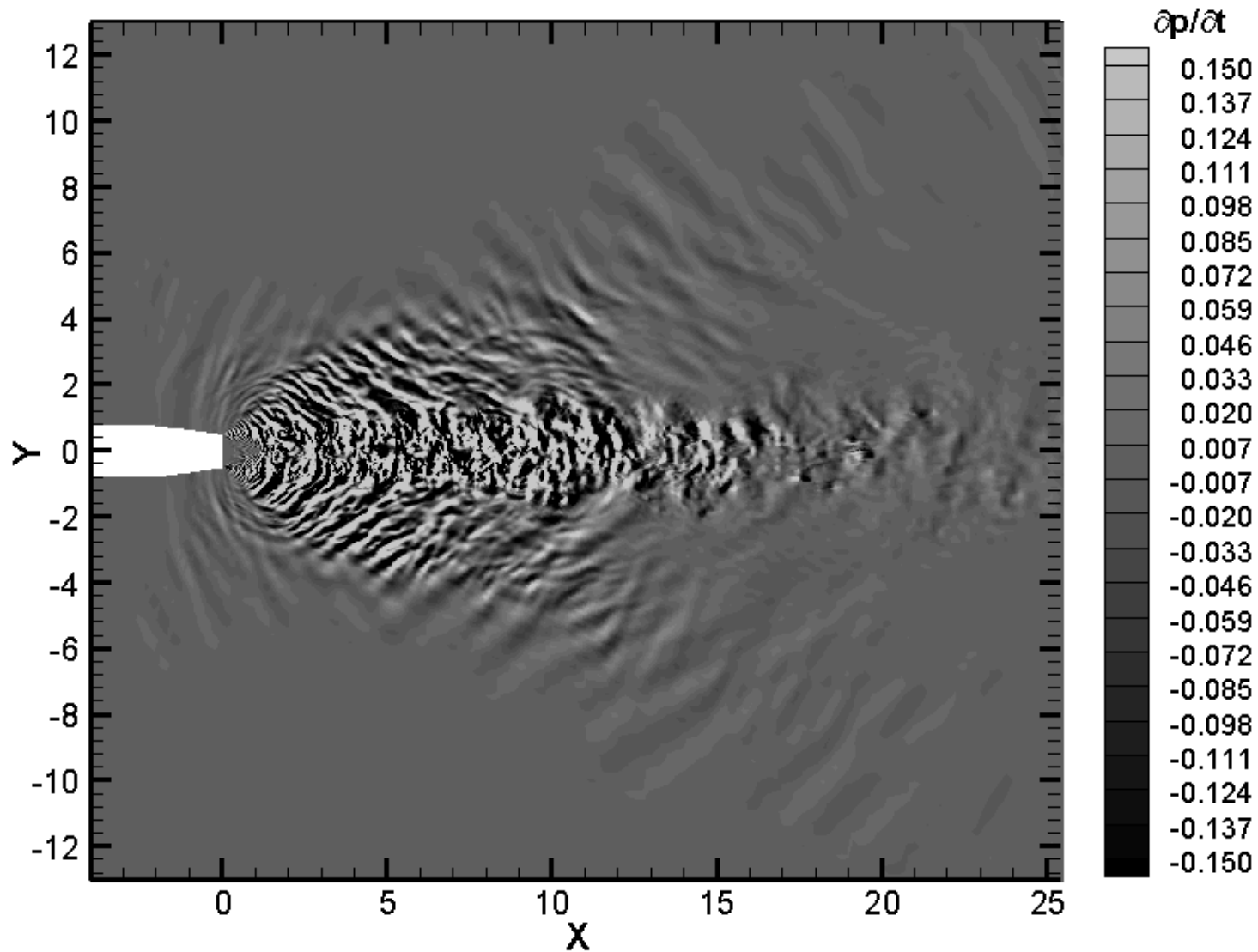
Переходный участок струи

- Существенная турбулизация потока
 - Взаимодействие когерентных структур, закрученных в разные стороны
- Возмущения давления
 - Основной источник шума от турбулентных струй



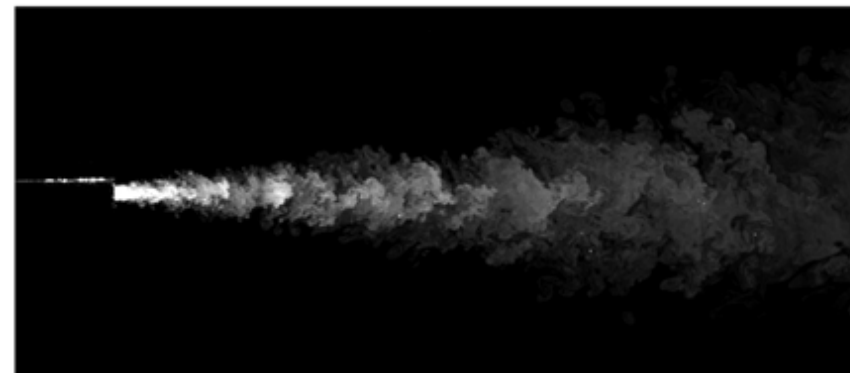
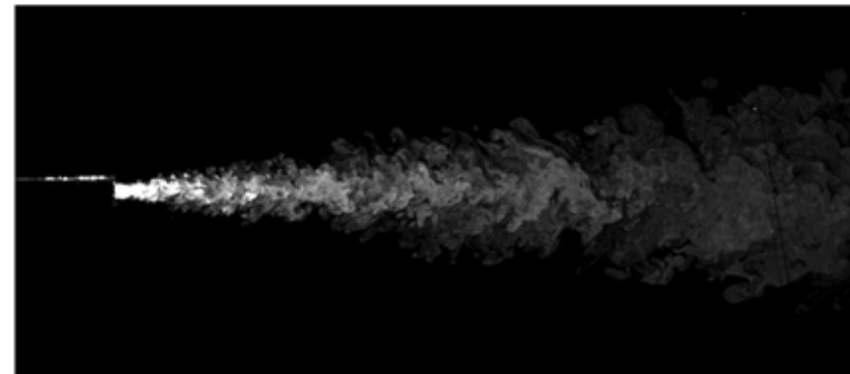
Аэроакустика

Round conical nozzle; $M=1.56$, $T_t=3.2$ jet



Влияние предыстории на характер турбулентности

- Характер турбулентности на переходном и основном участке струи зависит от сценария развития турбулентности на начальном участке
 - Энергетический спектр
 - Размер и форма когерентных структур
- В круглой и в плоской струях структура энергонесущих вихрей различна
 - Для большинства полуэмпирических моделей турбулентности (RANS) требуется перенастройка констант
 - ✓ В модель Секундова v_t -92 введена специальная поправка на осесимметричность



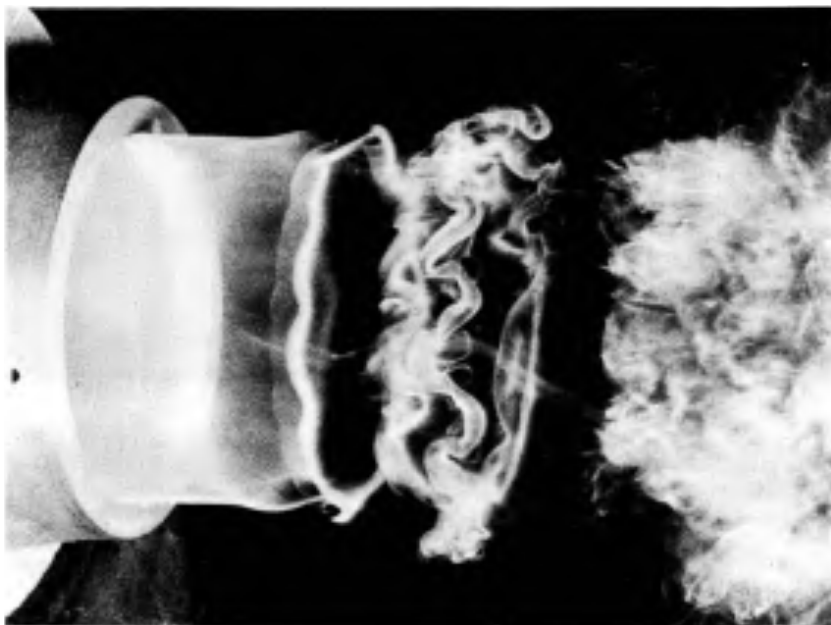
Increasing Re

(max Re \approx 12,000)

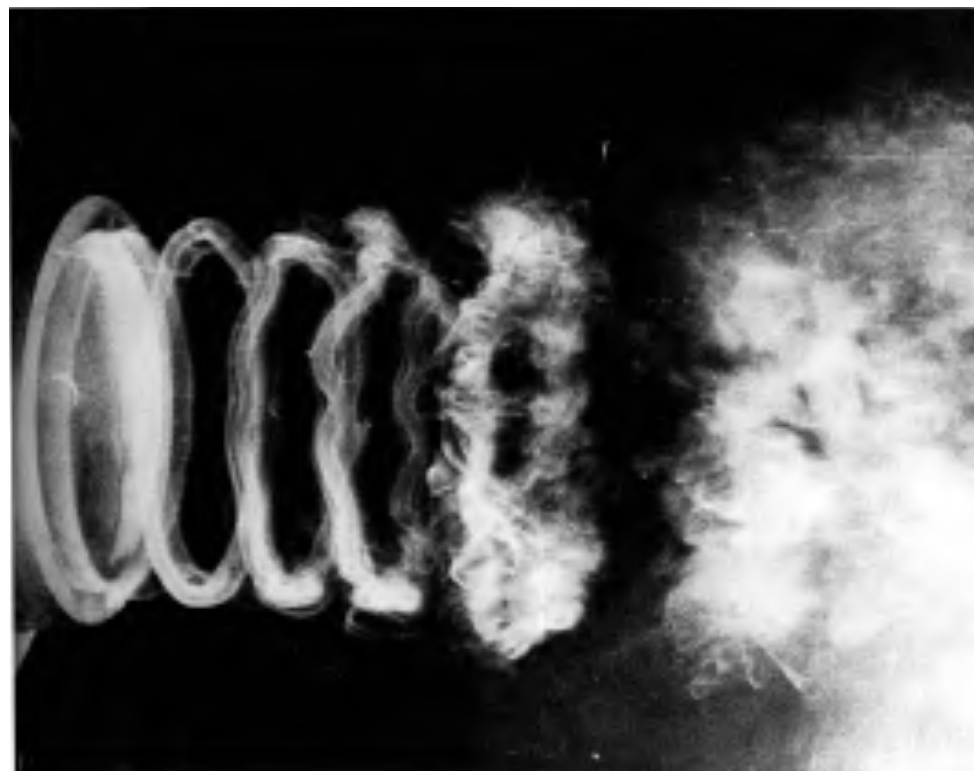
Управление переходом в струе

Влияние внешнего воздействия на переход в струе

- Под воздействием звукового сигнала подобранной частоты происходит более раннее сворачивание слоя смешения
 - Влияет на характер турбулентности вниз по потоку



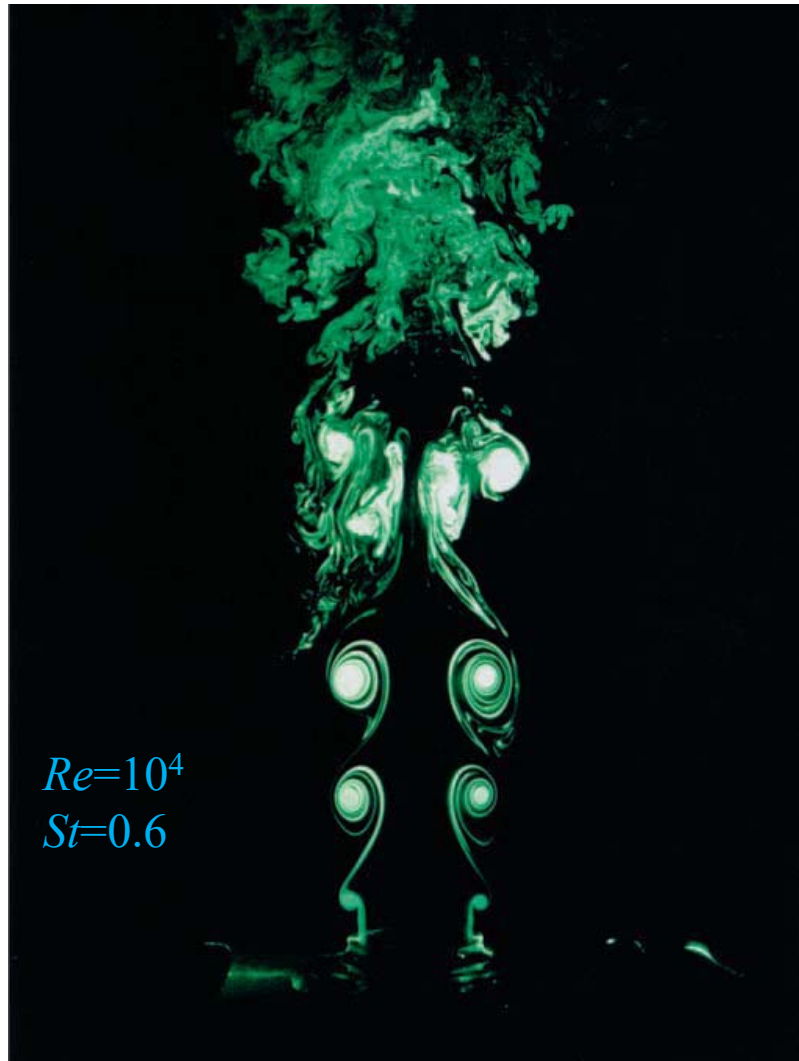
Естественный переход в струе



Переход, вызванный акустическим возмущением

Управление переходом в струе

Влияние внешнего воздействия может быть очень сильным



Один динамик по оси струи

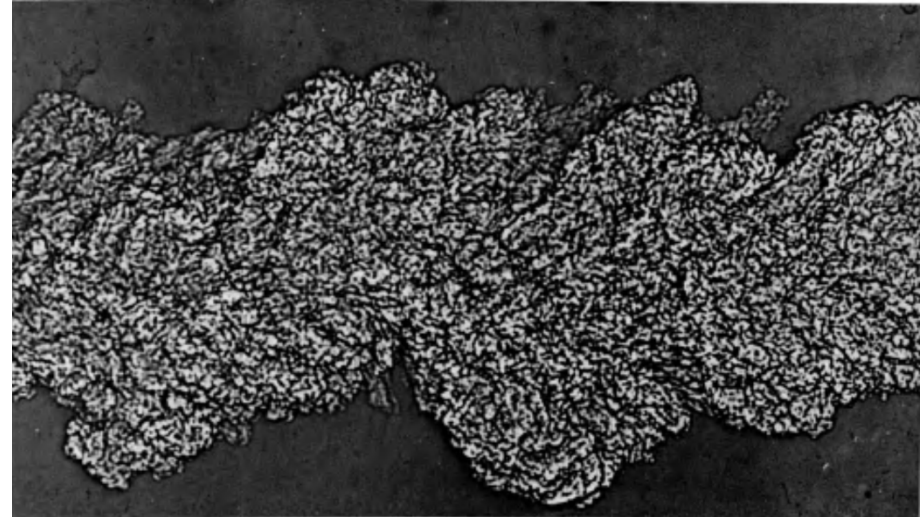


Два динамика вокруг выхода сопла

Дальний след за телом

- Сильно зависит от начальных условий

- Структура когерентных вихрей определяется формой обтекаемого тела
- Является автомодельным на больших расстояниях от тела
 - ✓ 150-500 размеров тела
- На таких расстояниях след почти «теряется»
 - ✓ Осесимметричный дальний след не рассматривают
 - Дефект скорости падает быстрее, чем в плоском следе
- В автомодельном решении ширина следа пропорциональна корню расстояния до тела



- С практической точки зрения более интересен ближний след

- При большой длине тела в третьем направлении когерентные вихри образуют шахматную структуру
 - ✓ Системы вихрей типа roller, braid, rib

Применение свободных сдвиговых течений

- Калибровка полуэмпирических моделей турбулентности
 - Когерентные структуры различных течений различаются
 - ✓ Невозможно хорошо описать все течения с одним набором констант



- Приходится «ориентировать» модель на определенный тип течений
 - Остальные течения предсказываются хуже
- Модель Спаларта-Аллмареса (SA)
 - Ориентирована на внешнюю аэродинамику
 - ✓ Слой смешения и дальний след
- Модель Секундова v_t -92
 - Ориентирована на расчет струйных течений
 - ✓ Плоская и осесимметричная струя
 - Поправка на осесимметричность

Резюме

- Свободные сдвиговые течения очень важны, поскольку их элементы в том или ином виде содержатся в более сложных течениях
- Обычно рассматривают три течения – слой смешения, затопленная струя, дальний след
- Когерентные структуры в разных течениях сильно отличаются
- Поэтому очень трудно создать модель турбулентности, одинаково хорошо описывающую все сдвиговые течения
- При создании моделей приходится делать выбор, на какое течение настраивать модель