

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)

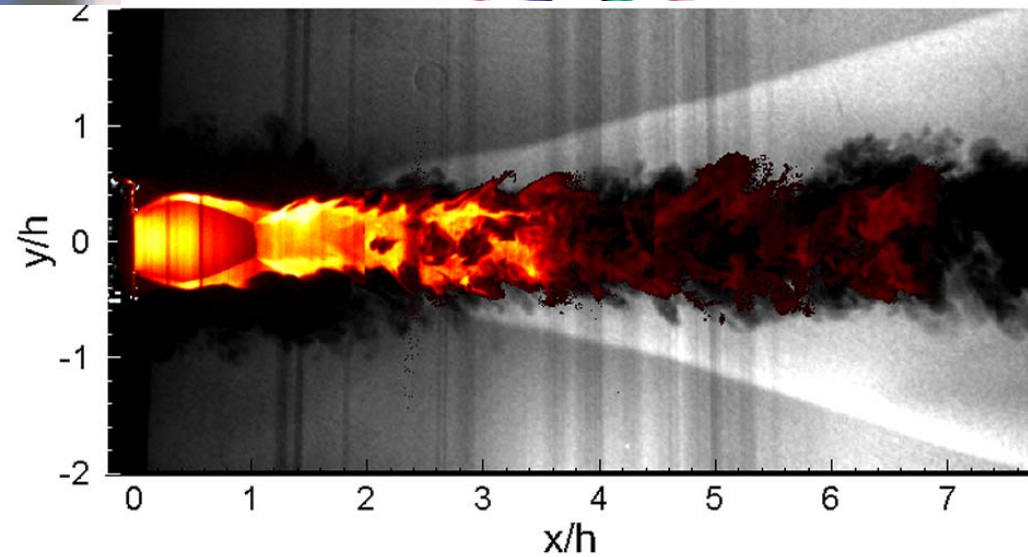
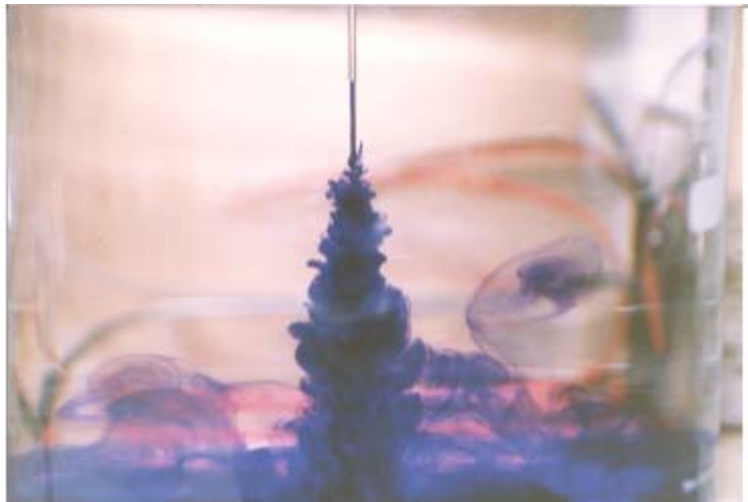
Лекция 2

Переход к турбулентности

Гарбарук Андрей Викторович (agarbaruk@mail.ru)
2023

Переход к турбулентности

- Течение вниз по потоку из ламинарного становится турбулентным
 - При этом говорят, что происходит **переход к турбулентности**



Переход к турбулентности

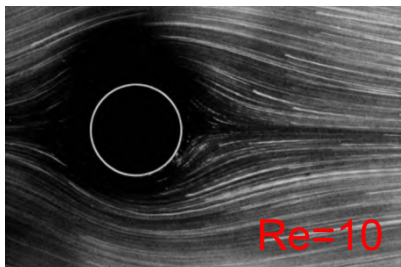
При рассмотрении перехода можно задаваться разными вопросами:

- Почему происходит переход?
- Когда и как он происходит (сценарий перехода)?
- Как его промоделировать при проведении расчетов?

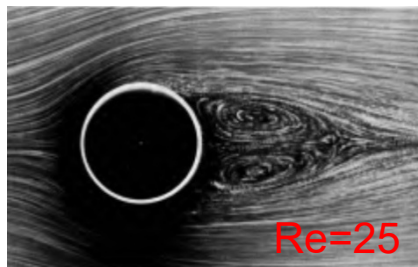
Первым вопросом занимается теория динамического хаоса – один из разделов синергетики (науки о самоорганизации)

- Неустойчивость – признак того, что такая форма движения не может больше существовать
 - Должна появиться новая форма движения
 - Процесс ветвления решения называется бифуркацией
- Такой подход позволяет отвлечься от детального рассмотрения самого процесса перехода

Стационарное
безотрывное



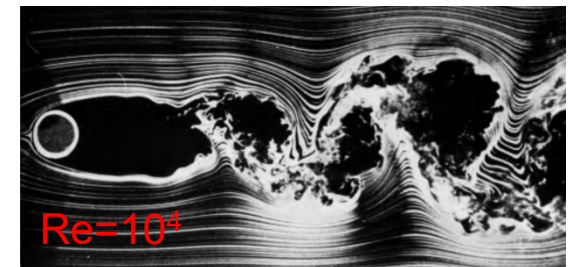
Стационарное
отрывное



Нестационарное
упорядоченное



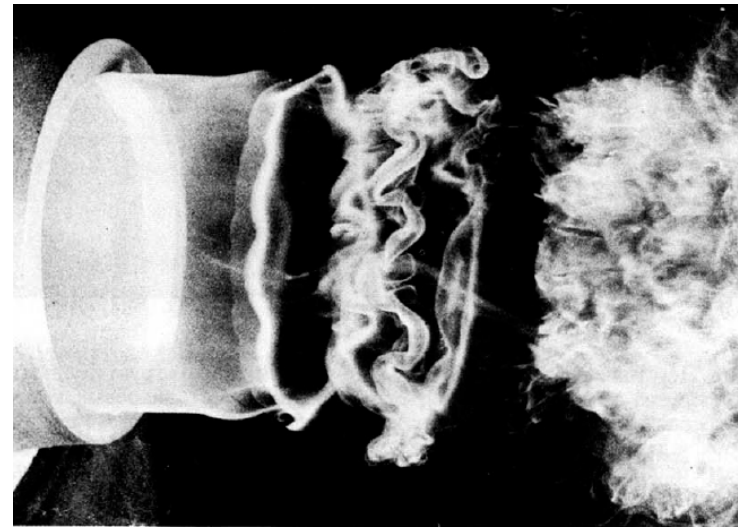
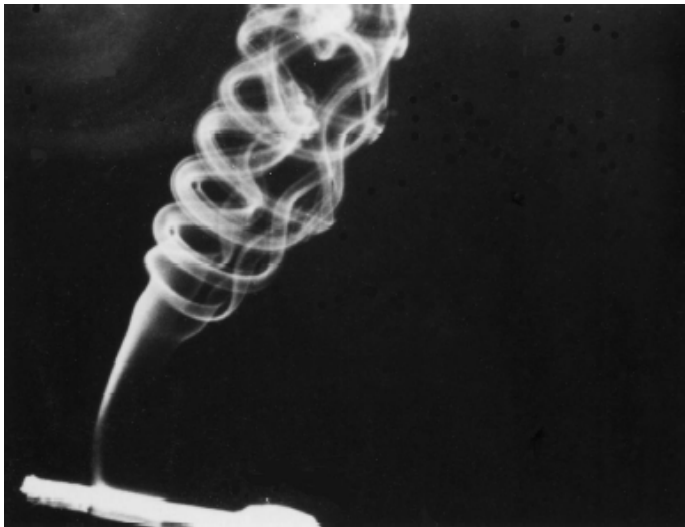
Турбулентное



Изменение структуры течения при увеличении числа Рейнольдса

Когда происходит переход к турбулентности

При значениях числа Рейнольдса $Re=UL/\nu$, превышающих некоторое критическое значение, упорядоченное стационарное движение газов и жидкостей (*ламинарное движение*) теряет устойчивость и становится *турбулентным*

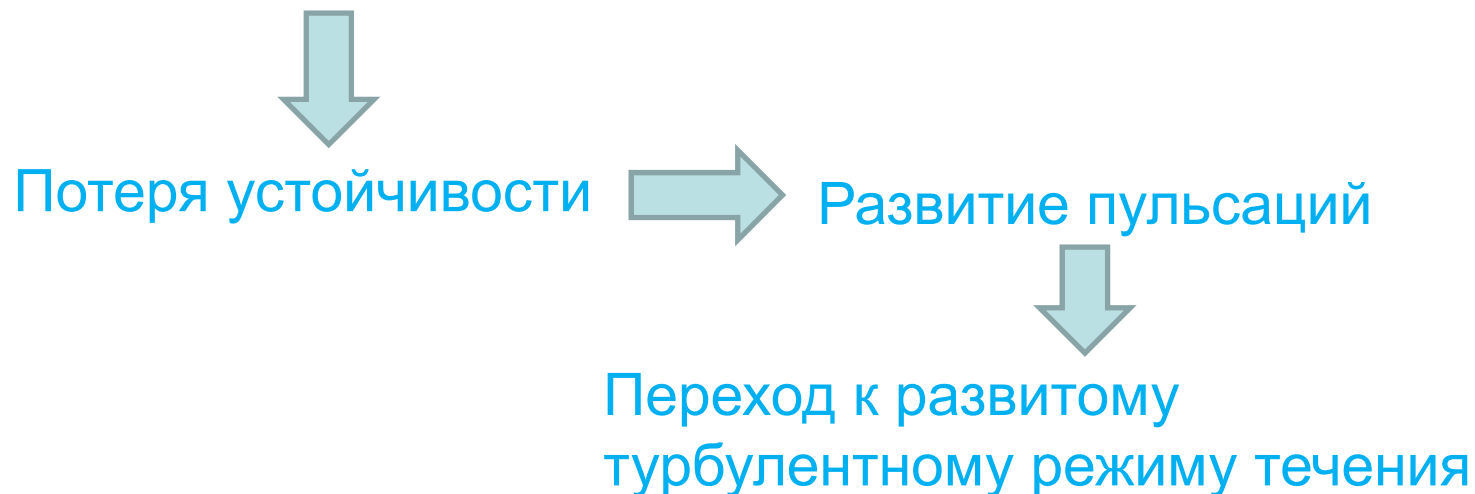


- Критические значения чисел Рейнольдса различны для разных течений, но не очень велики, так что подавляющее большинство реальных течений в природе и технике являются турбулентными

Почему возникает турбулентность?

- Число Рейнольдса характеризует соотношение сил инерции (конвекции) и вязкости в рассматриваемом течении.
- Конвекция дестабилизирует течение, а вязкие силы – стабилизируют.
 - Объемные силы также могут стабилизировать или дестабилизировать течение
 - ✓ Температурная стратификация
 - ✓ Центробежная и Кориолисова силы

Увеличение числа Рейнольдса (превышение $Re_{кр}$)



Потеря устойчивости

Потеря устойчивости потока зависит как от типа течения, так и от множества других факторов



Не существует «универсального» числа Рейнольдса перехода



- Отрицательный градиент давления (ускоряющийся поток)
- Положительный градиент давления (замедляющийся поток)

Влияние градиента давления на переход к турбулентности в пограничном слое

Вопросами определения границ устойчивости занимается теория устойчивости

Теория устойчивости

Рассмотрим методы линейной теории устойчивости на примере модельной задачи

- Пусть \bar{u} - стационарное решение модельного уравнения
$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

- Это решение будет неустойчивым в том случае, если внесенные малые возмущения будут расти со временем

- Представим нестационарное решение в следующем виде
$$u = \bar{u} + u' \quad (2)$$

- Пренебрегая квадратичными относительно малых возмущений слагаемыми из (1) и (2) можно получить уравнение для возмущений
$$\frac{\partial u'}{\partial t} + \frac{\partial(2\bar{u}u')}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

- Представим возмущения в следующем виде

$$u' = \hat{u} \cdot \exp(\omega t) = \hat{u} \cdot \exp([\omega_R + i\omega_I]t) = \hat{u} \cdot \exp(\omega_R t) \cdot (\cos(\omega_I t) + i \sin(\omega_I t)) \quad (4)$$

- С учетом (4) уравнение (3) преобразуется в
$$\omega \hat{u} + \frac{\partial(2\bar{u}\hat{u})}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

- Уравнение (5) - это обобщенная задача на собственные значения.

- Наличие решения с $\omega_R > 0$ означает неустойчивость решения

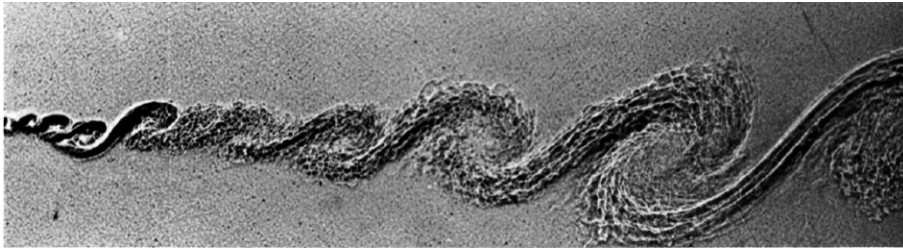
Линейная теория устойчивости

- Предсказывает линейные возмущения
 - Экспоненциальный рост амплитуды
- С ростом возмущений начинают играть роль нелинейные эффекты
 - Линейная теория применима только на начальном этапе потери устойчивости

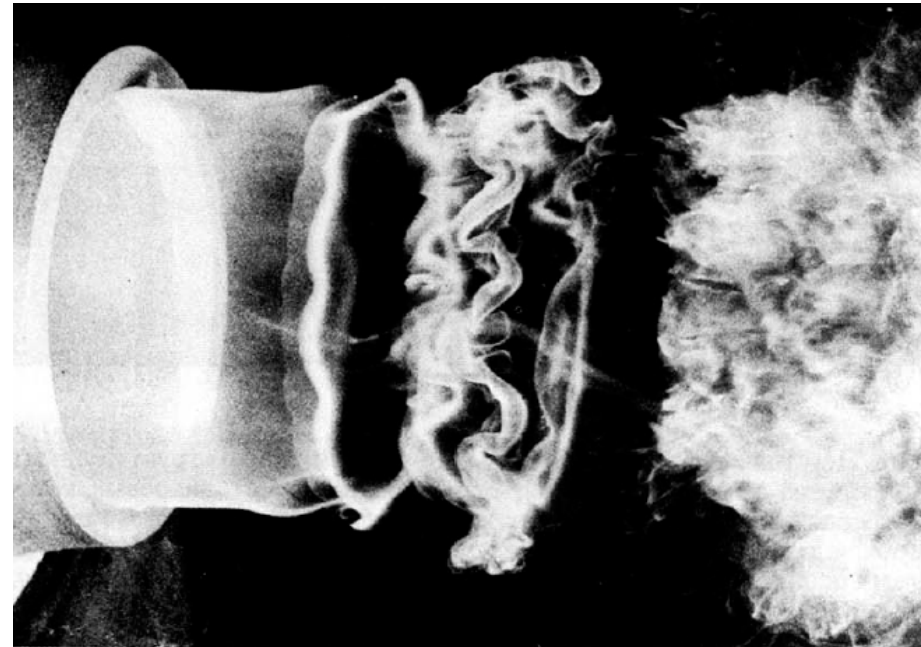
Некоторые примеры применения

- Параллельный поток без учета сил вязкости
 - Уравнение Рэлея
 - Теорема Рэлея: необходимым условием потери устойчивости является наличие точки перегиба
 - ✓ Парадокс об устойчивости течения в канале
- Автомодельные уравнения пограничного слоя
 - Время ассоциируется с продольной координатой
 - ✓ Конвективная неустойчивость
 - Уравнения Орра-Зоммерфельда
- Двумерные течения
 - Существенные вычислительные затраты

Сценарий возникновения турбулентности в свободных течениях



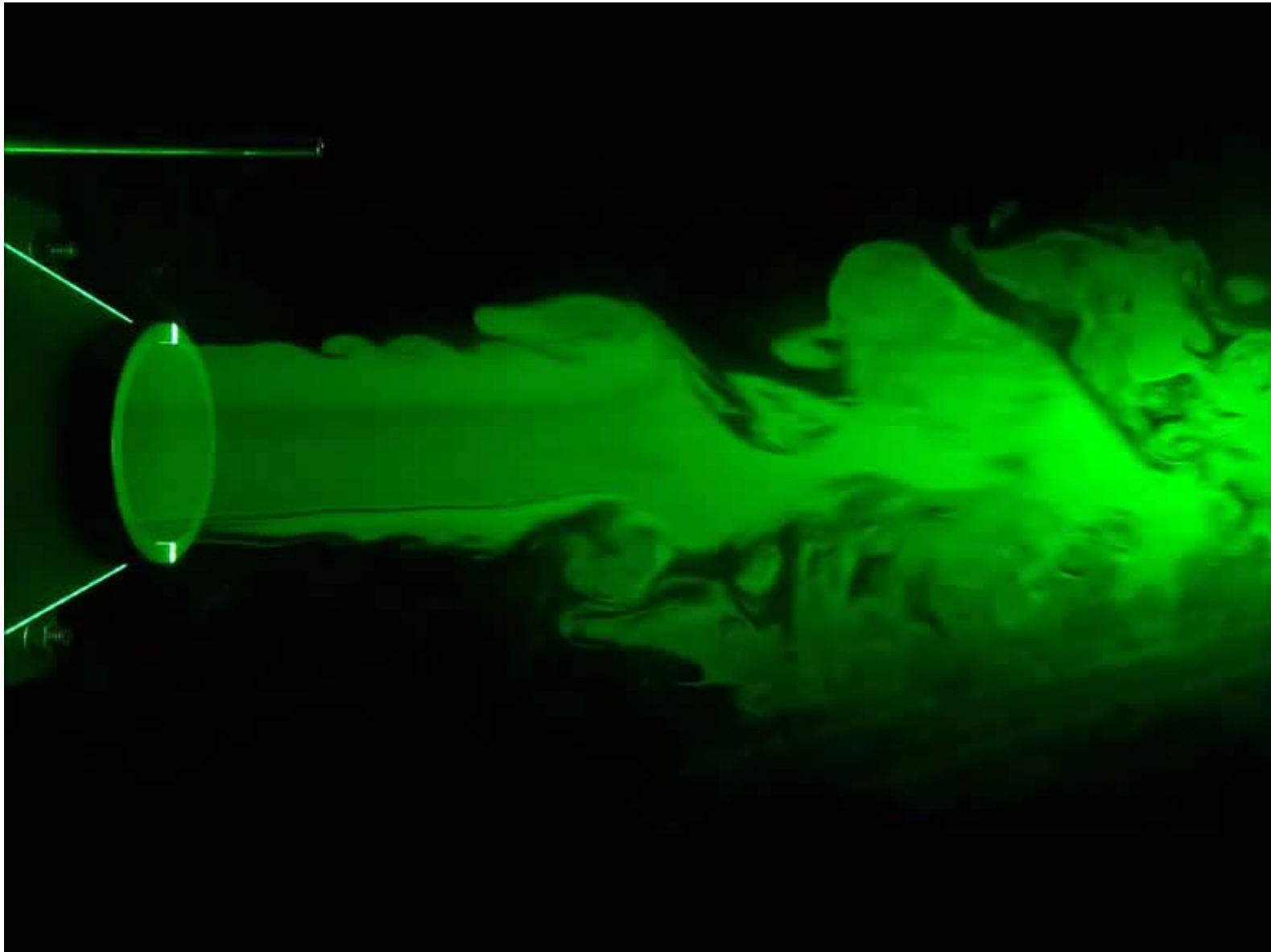
Турбулизация слоя смешения
(неустойчивость Кельвина-
Гельмгольца)



Турбулизация круглой струи

Появление систем упорядоченных движений, которые на определенном этапе турбулизуются

Переход в струе



Переход в струе в сносящем потоке

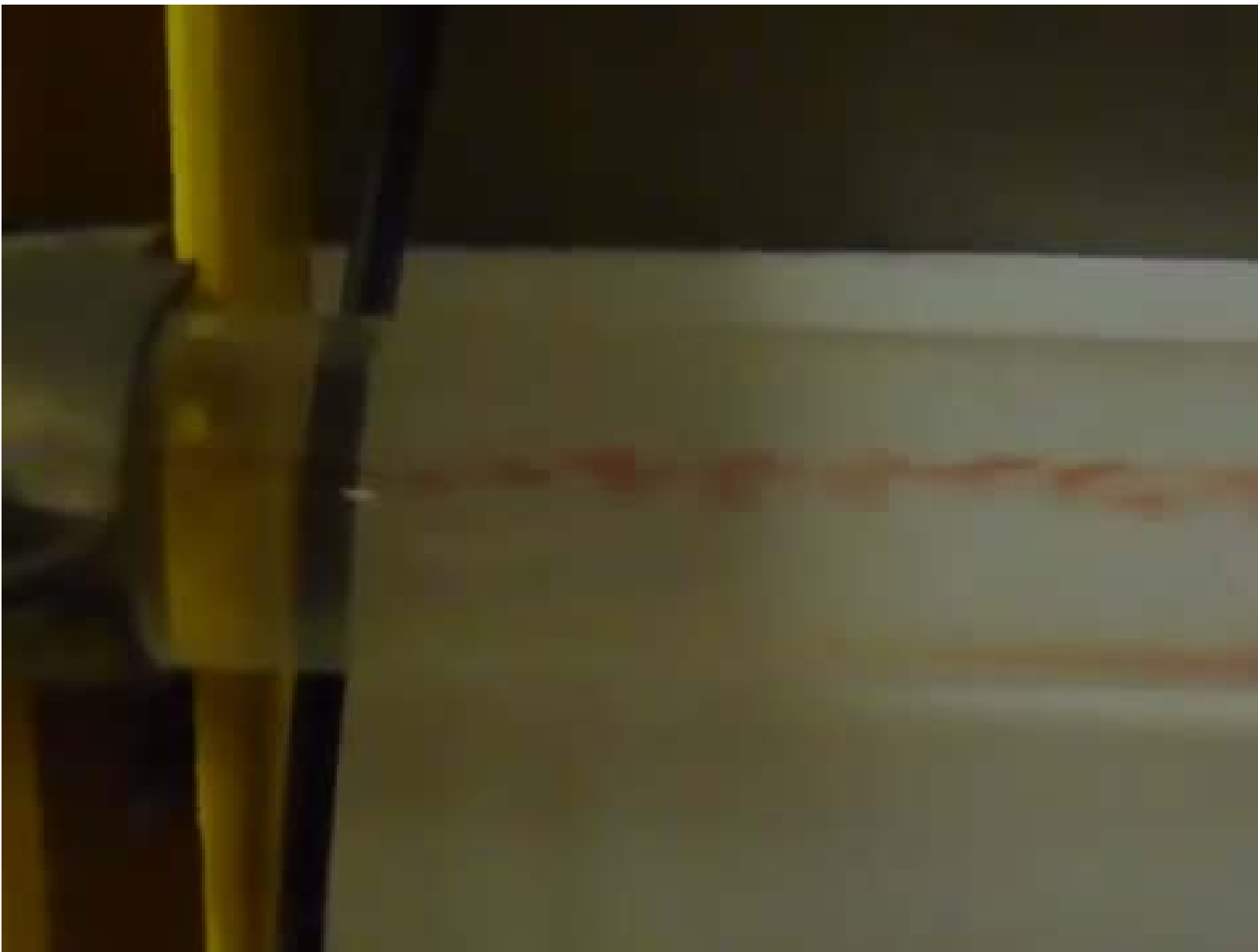
Reynolds number: $Re = \frac{U\delta_0^*}{\nu} = 165$



Переход к турбулентному режиму в трубах

- В экспериментах обычно рассматривают переход в трубах при однородном профиле на входе
 - Установление развитого течения происходит в 2 этапа
 - ✓ Развитие пограничных слоев при наличии ядра
 - ✓ Перестройка профиля
 - Опыты Рейнольдса
 - ✓ Длина переходного участка пропорциональна Re_D и может превосходить $100D$
- Начало перехода зависит от числа Рейнольдса Re_D и уровня турбулентности Tu
 - $Re_D < 2000$ – течение ламинарное
 - $Re_D > 2600$ – обычно турбулентное
 - При низком уровне турбулентности можно долго сохранять ламинарное течение при $Re_D \approx 100000$
 - ✓ При бесконечно длинной трубе переход когда-нибудь произойдет
- При переходе к турбулентному режиму в канале появляются «турбулентные пробки»
 - Их зарождение аналогично турбулентным пятнам в пограничном слое
 - Доля «пробок» растет по мере роста числа Рейнольдса
 - ✓ При $Re_D > 2600$ пробки заполняют всю трубу

Опыты Рейнольдса



Потеря устойчивости

- При переходе критического числа Рейнольдса течение Пуазейля становится неустойчивым

- Неустойчивость Толлмина-Шлихтинга

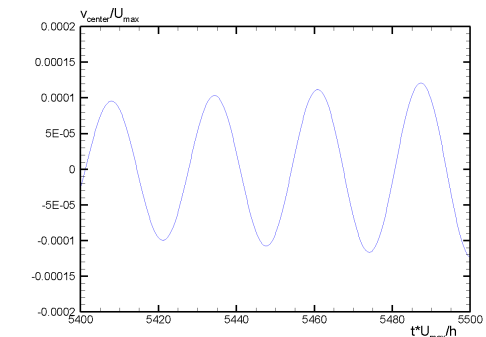
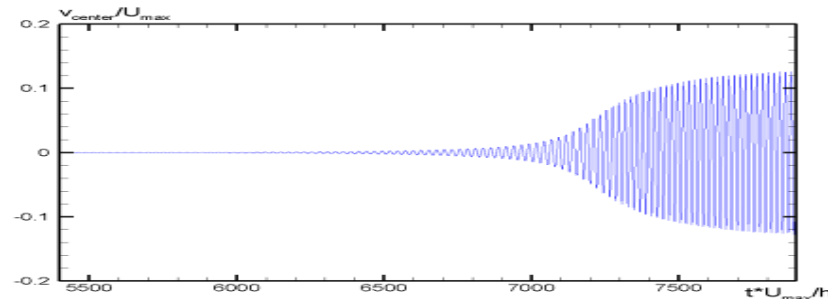
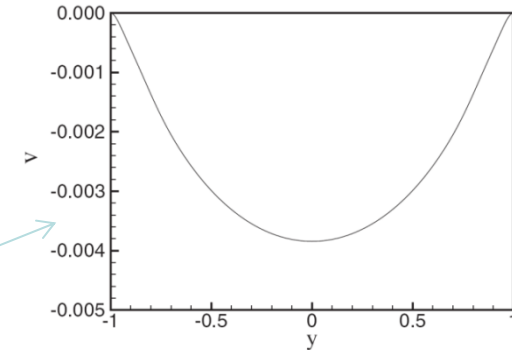
- Эта неустойчивость хорошо предсказывается

- Уравнения Орра-Зоммерфельда

- ✓ Профиль возмущений поперечной скорости

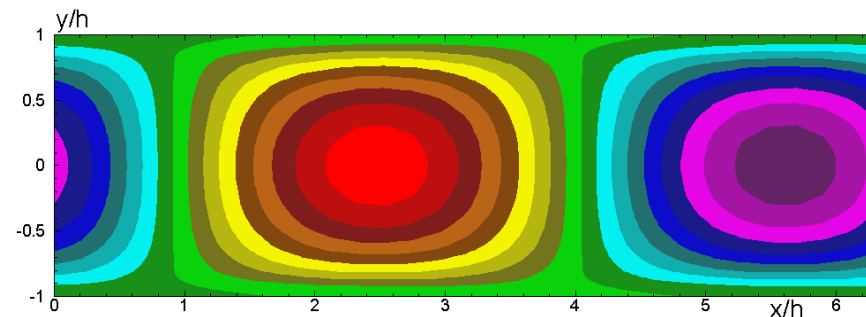
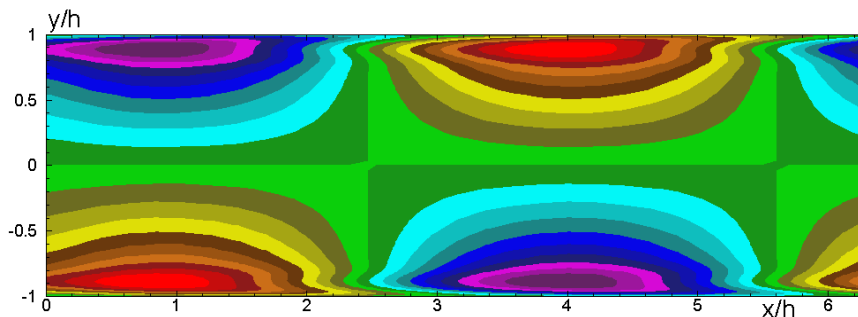
- Решение нестационарных уравнений

- Развитие возмущений во времени



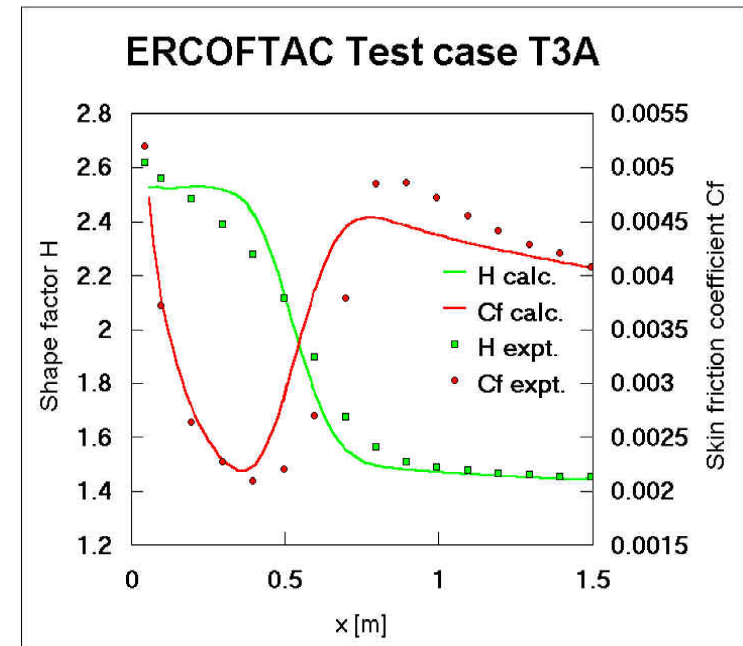
- Двумерный анализ устойчивости

- ✓ Поля возмущений продольной и поперечной скорости



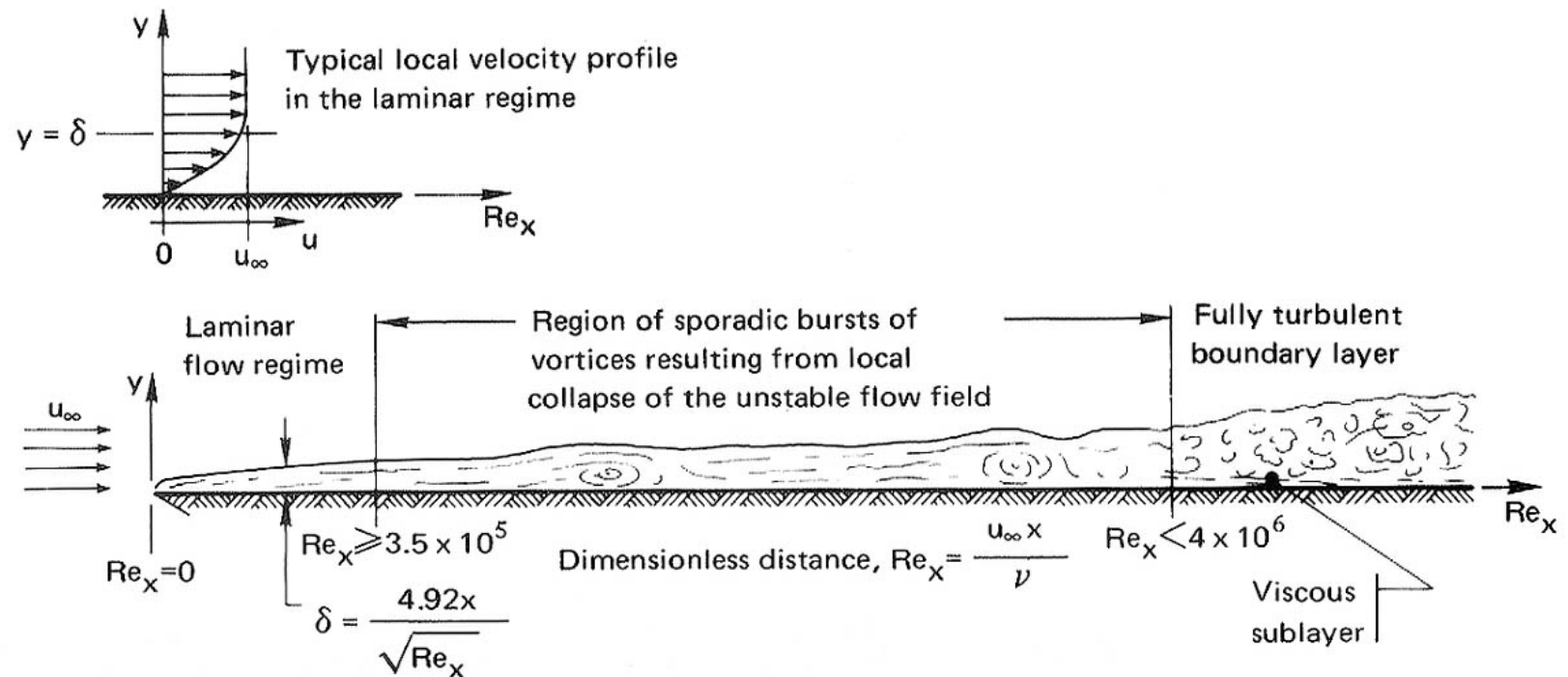
Переход к турбулентности в пограничном слое

- Толщина пограничного слоя растет вниз по потоку
 - Рост числа Рейнольдса
 - ✓ Ламинарно-турбулентный переход
- В зависимости от уровня турбулентности внешнего потока переход к турбулентности на плоской пластине происходит при
 - $Re_\theta = 320 \div 1000$
 - $Re_x = 5 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^6$
- Происходит перестройка течения
 - Профиль скорости меняется
 - ✓ от профиля Блазиуса к турбулентному профилю
 - Коэффициент трения резко возрастает в несколько раз (около 5)
 - Формпараметр H падает
 - ✓ от 2.6 до $\sim 1.4-1.5$.
 - Меняется зависимость толщины пограничного слоя от x
 - ✓ От $\sim x^{1/2}$ в ламинарном слое к $\sim x$ в турбулентном



Переходный участок

- Процесс развития возмущений в пограничном слое и дальнейшая перестройка профиля происходят не моментально
 - Переходный участок
- Расчет переходного участка пограничного слоя крайне сложная задача
 - Существенно для задач, в которых переходный участок занимает заметную часть течения



Переходный участок в турбулентном пограничном слое

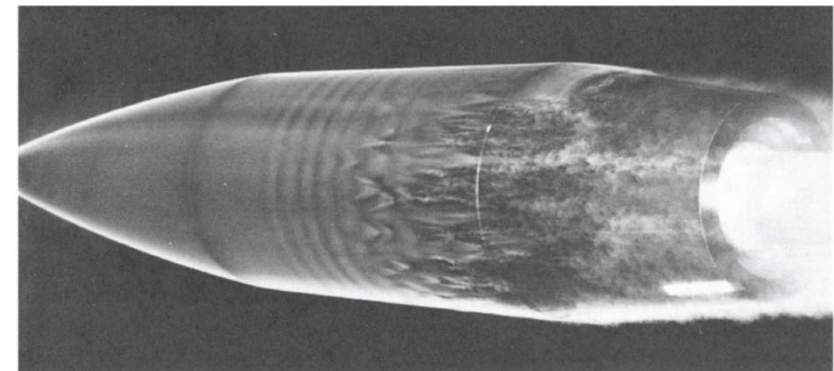
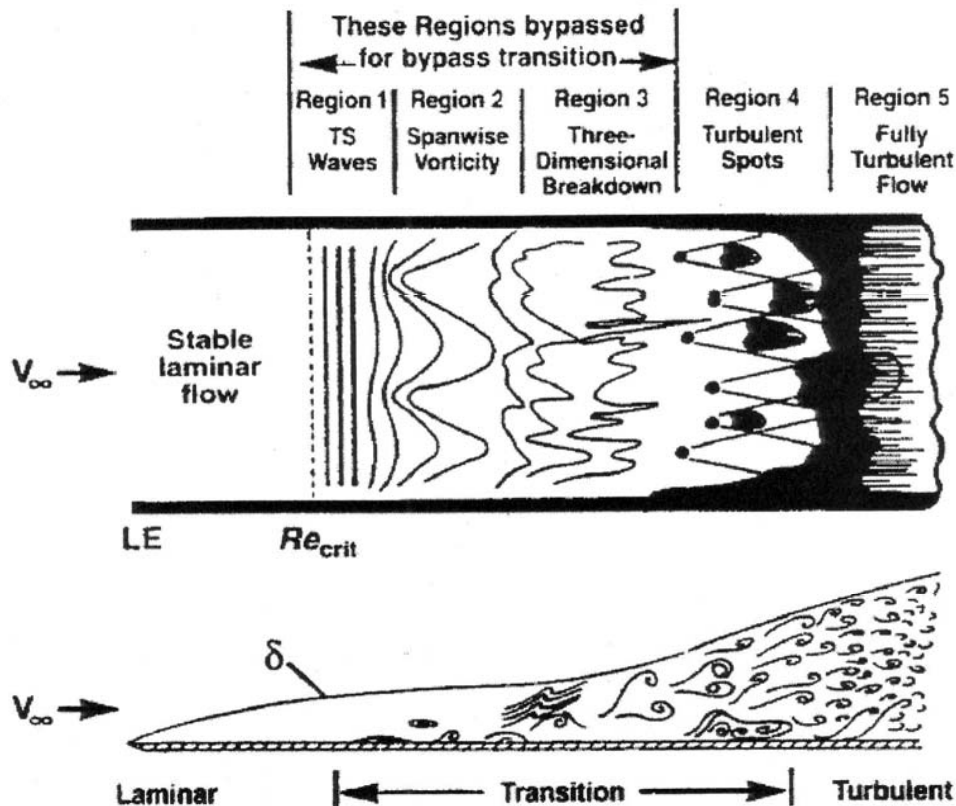
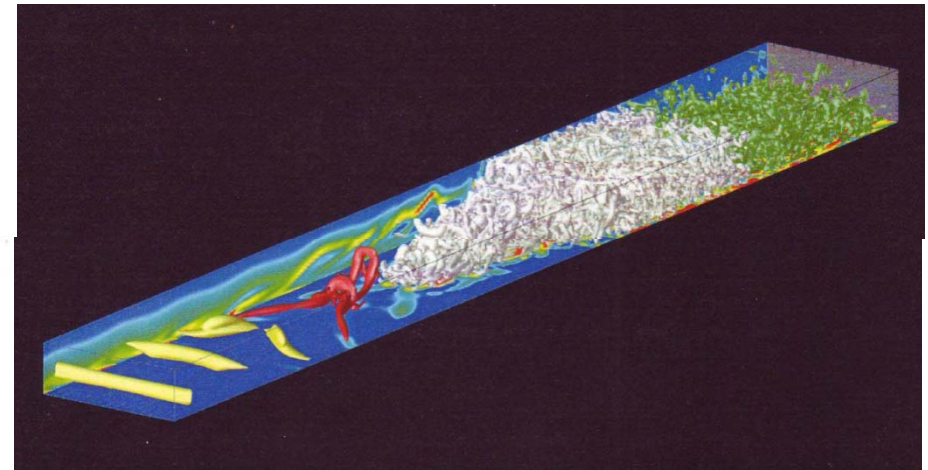
Сценарии перехода в пограничном слое

- Естественный переход (natural transition)
 - Наблюдается при малой степени турбулентности внешнего потока ($<0.5\%$)
 - Характерен для задач внешней аэродинамики
- Вынужденный (байпасный) переход
 - Происходит при высокой степени турбулентности внешнего потока ($>0.5\%$)
 - Характерен для задач внутренней аэродинамики
 - Часто называется байпасным переходом (bypass transition), поскольку при нем отсутствует («обходится» - bypass) участок линейной неустойчивости, на котором развиваются волны Толлмина-Шлихтинга
- Отрывной переход (separated-induced transition, bubble transition)
 - Неблагоприятный градиент давления приводит к отрыву ламинарного пограничного слоя, который быстро турбулизуется и присоединяется
 - Часто встречается при обтекании крыловых профилей
- Неустойчивость поперечного течения (cross-flow instability)
 - Профиль скорости поперечного течения имеет перегиб, что приводит к неустойчивости
 - Встречается при решении существенно трехмерных задач

Естественный переход в пограничном слое

1. Потеря устойчивости, появление волн Толлмина-Шлихтинга
2. Появление двумерных вихрей
3. Развал на трехмерные структуры
4. Появление турбулентных пятен
5. Полностью турбулентное течение

Отсутствует при байпасном переходе

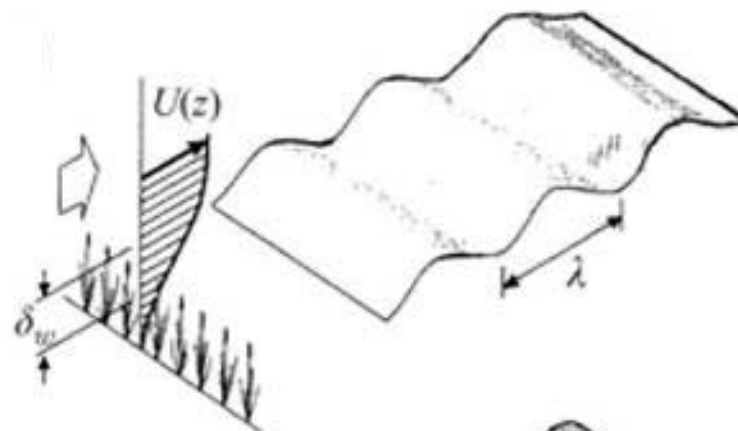


Пример визуализации дымом
[Mueller et al, AIAA J., 1991, V19, p.1608]

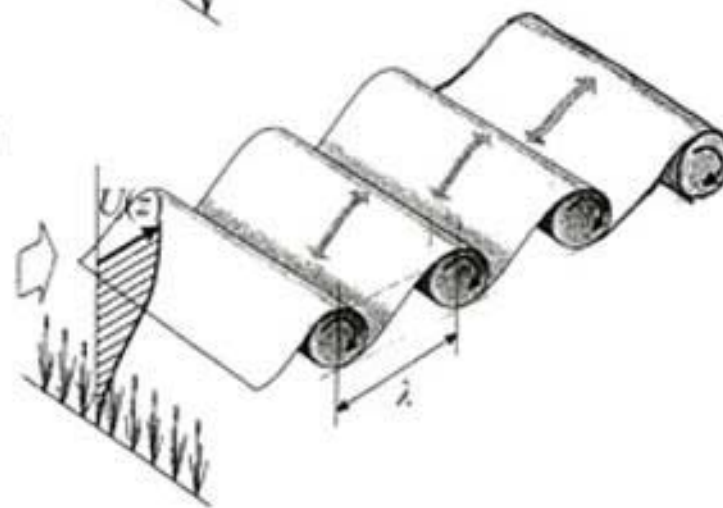
The natural transition process (from Schlichting, 1979)

Этапы перехода

1. Неустойчивость пограничного слоя приводит к появлению волн Толлмина-Шлихтинга



2. Градиент скорости приводит к сворачиванию продольных вихрей типа roller



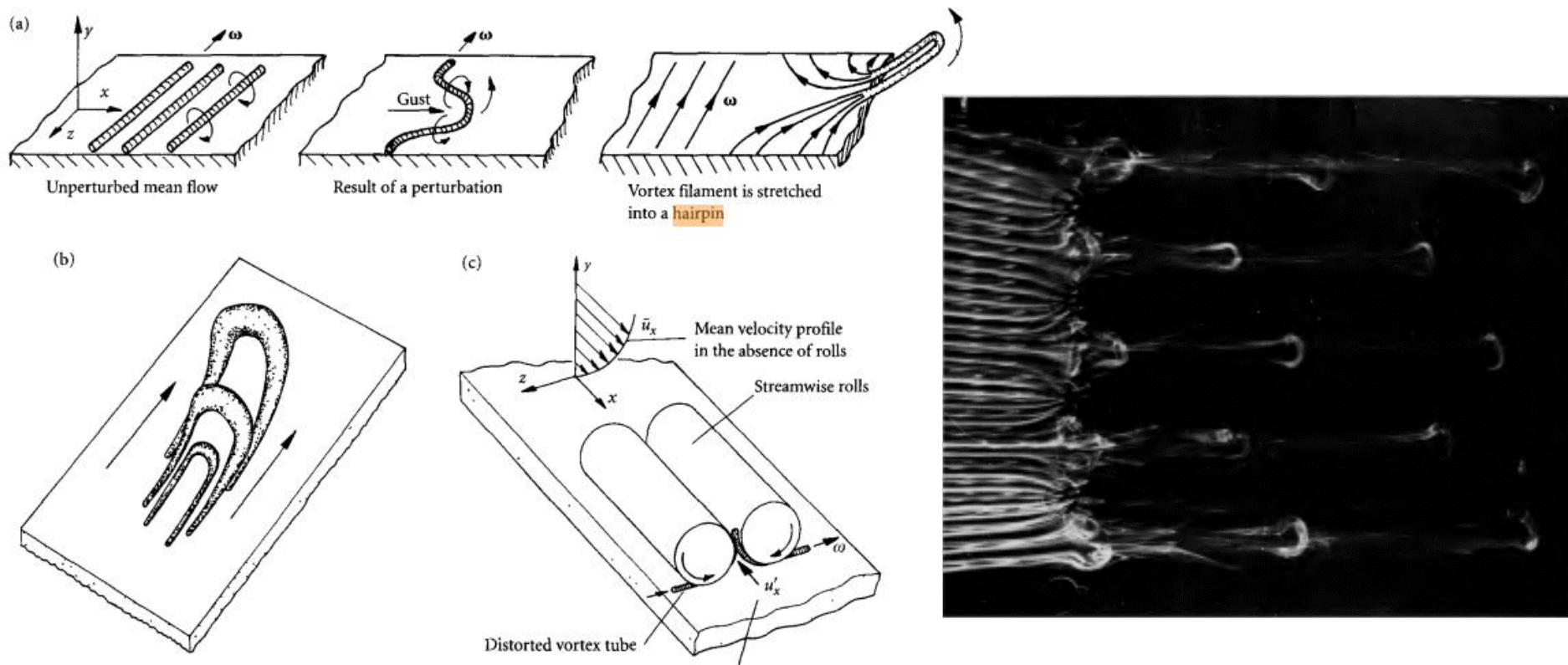
Волны Толлмина-Шлихтинга



Этапы перехода

3. Градиент скорости приводит к появлению шпилькообразных (подковообразных, lambda) вихрей

- Их развитие ведет к доминированию продольных вихрей в пристенной области



Развитие шпилькообразных вихрей

Шпилькообразные вихри
в пограничном слое

Lambda-вихри

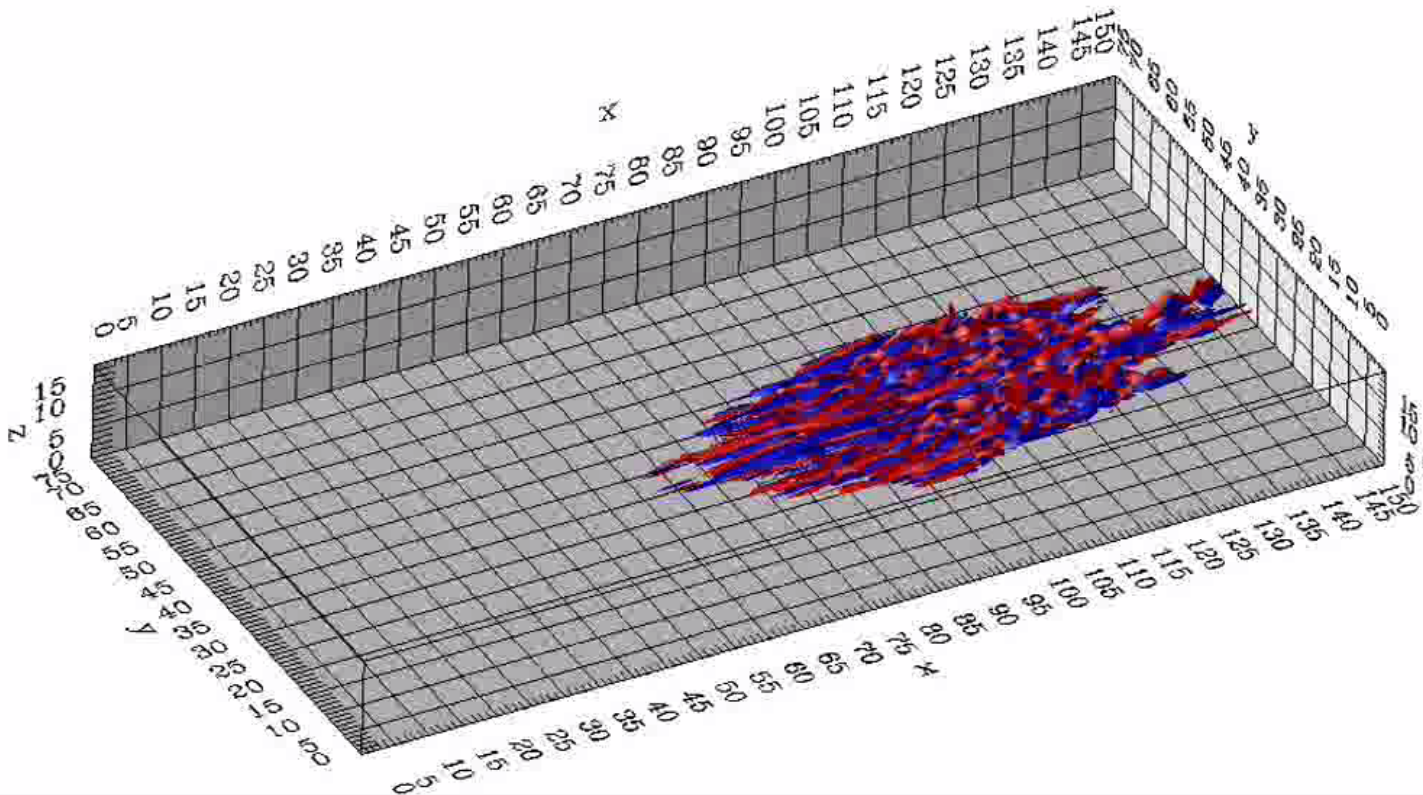
head vortex
above b_1

Поведение лямбда-вихря
у верхней границы
пограничного слоя

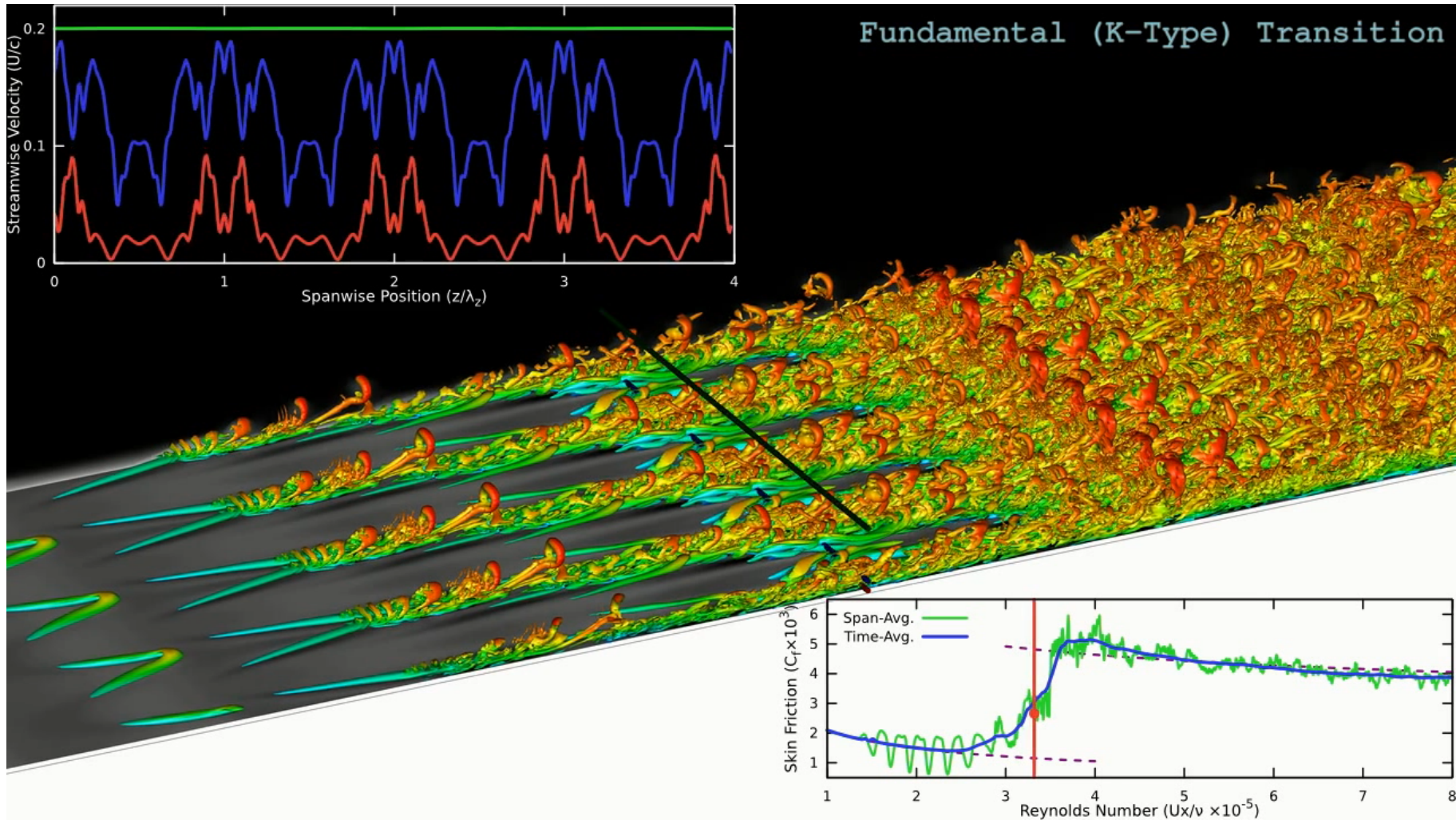
Этапы перехода

4. Появление характерных турбулентных пятен (пятна Эммонса)

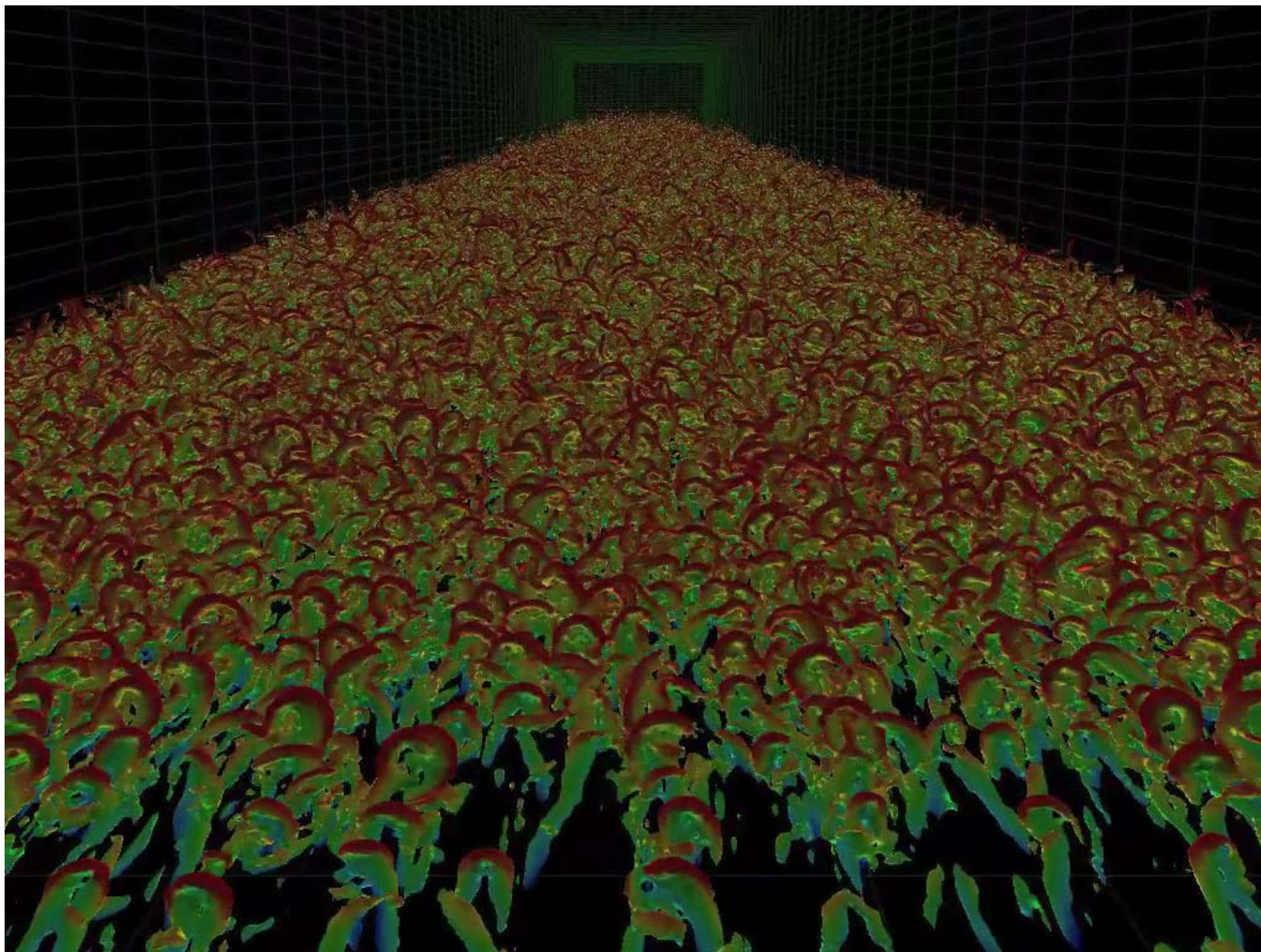
- Количество турбулентных пятен увеличивается вниз по потоку
 - ✓ Сливаясь, турбулентные пятна заполняют весь пограничный слой



Переход в пограничном слое

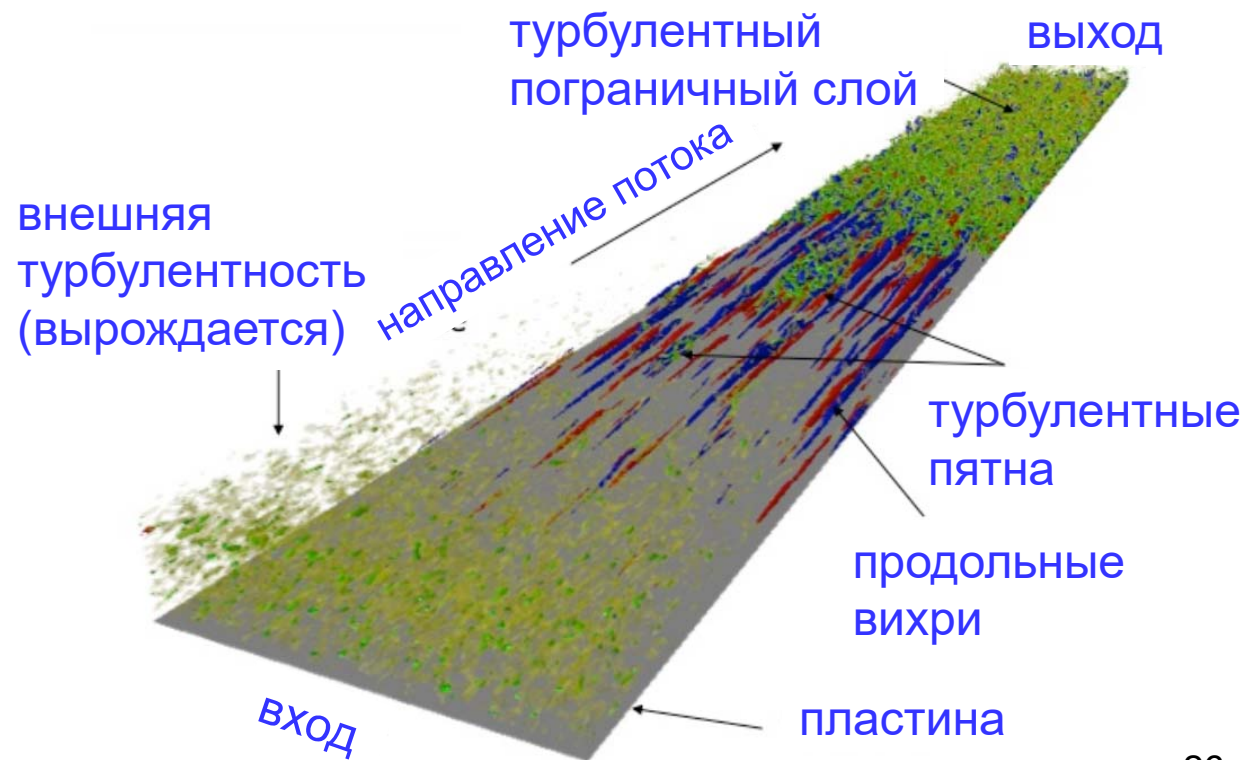
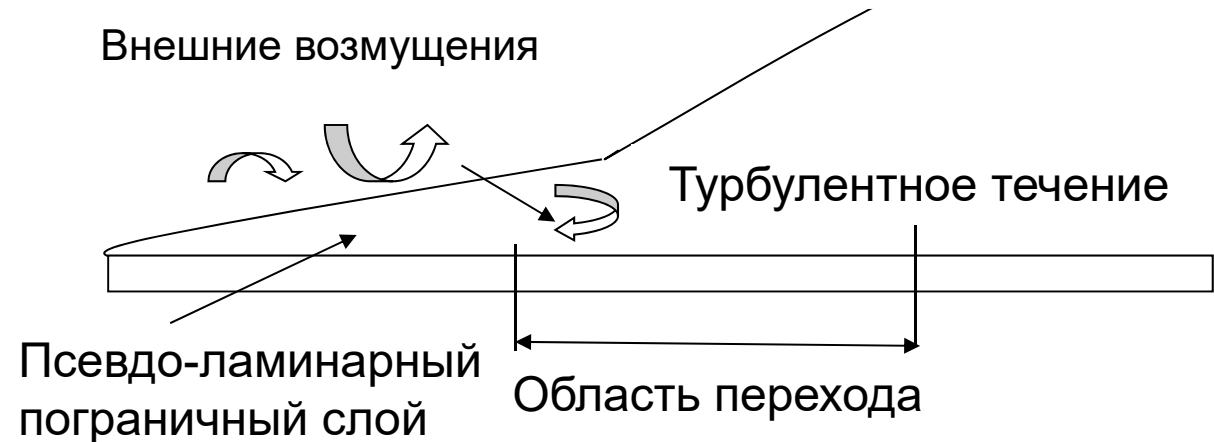


Переход в пограничном слое



Вынужденный переход ($Tu \sim 0.5-10\%$)

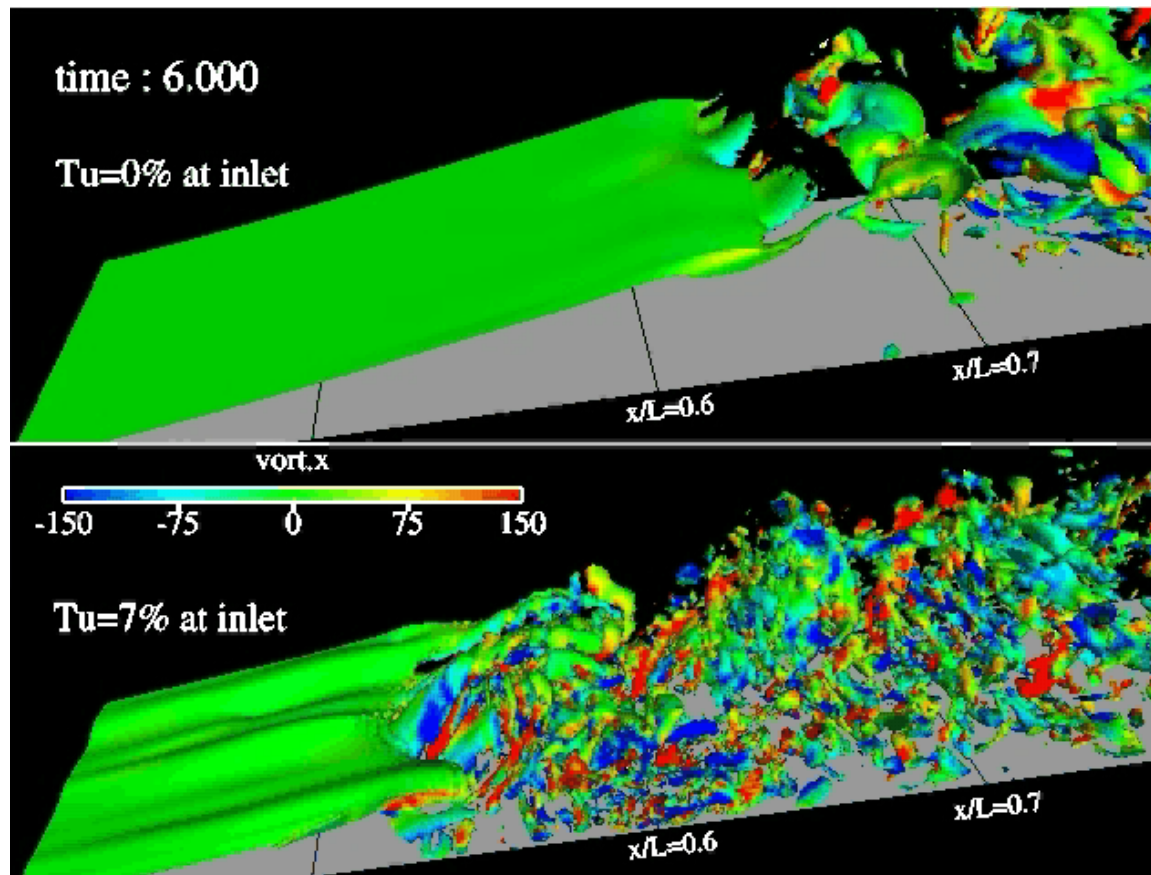
- Возмущения внешнего потока искажают профиль скорости в пограничном слое
 - Возникает другой тип неустойчивости
- Возмущения большой амплитуды проникают из внешнего потока в пограничный слой
 - Это сокращает длину области перехода



Влияние степени турбулентности внешнего потока на переход

При высоком уровне турбулентности внешнего потока переход происходит раньше

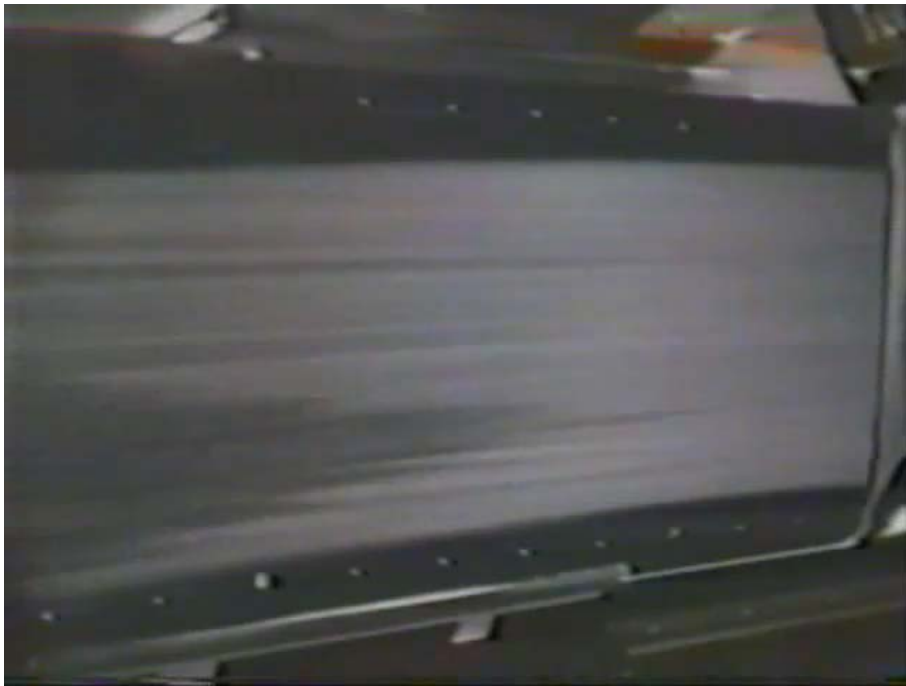
- Переходный участок существенно короче



Сравнение естественного и байпасного перехода в пограничном слое

Вынужденный переход

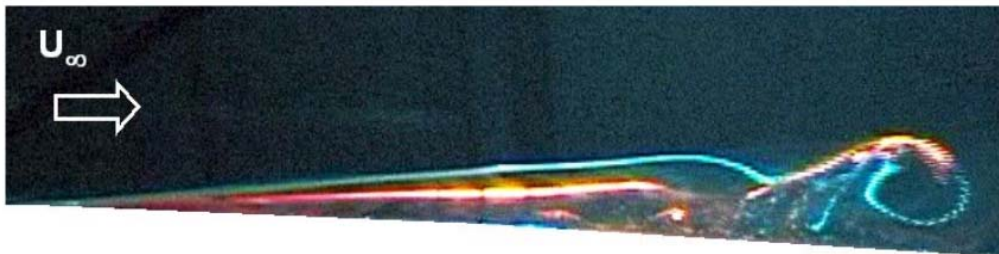
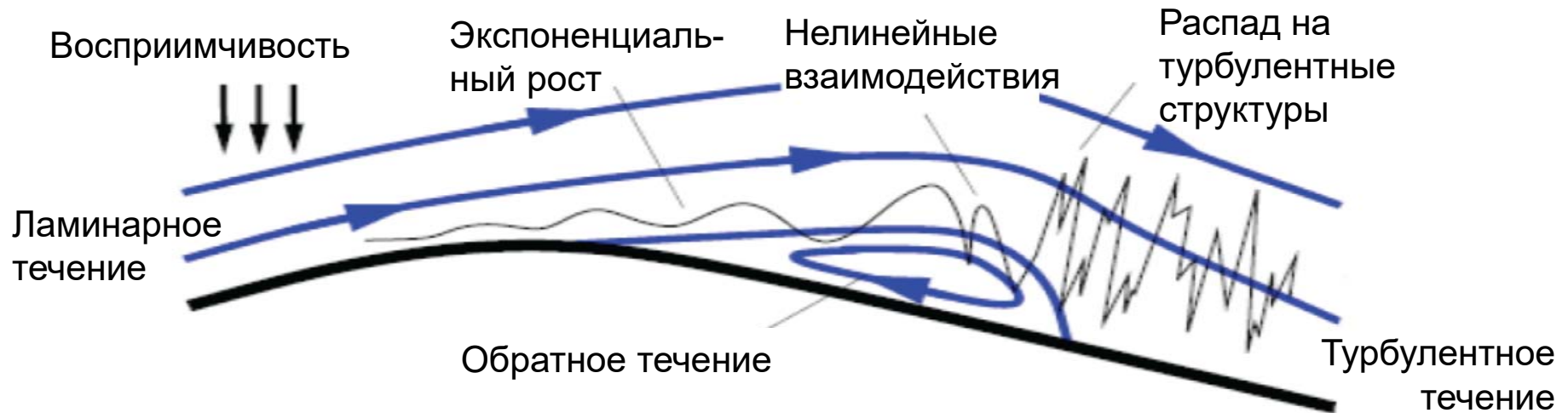
$Tu=2.2\%$



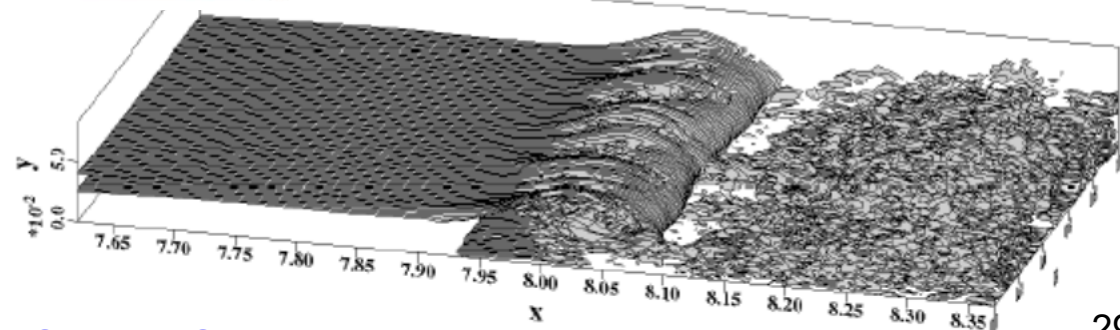
$Tu=6.6\%$



Переход, индуцированный локальным ламинарным отрывом (пузырьковый)



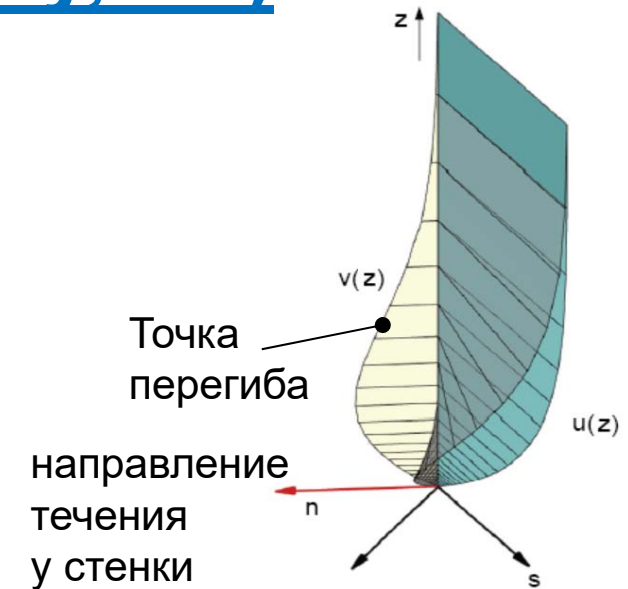
Визуализация в течении воды, Univ. Stuttgart [Lang, Rist, Wagner, 2002]



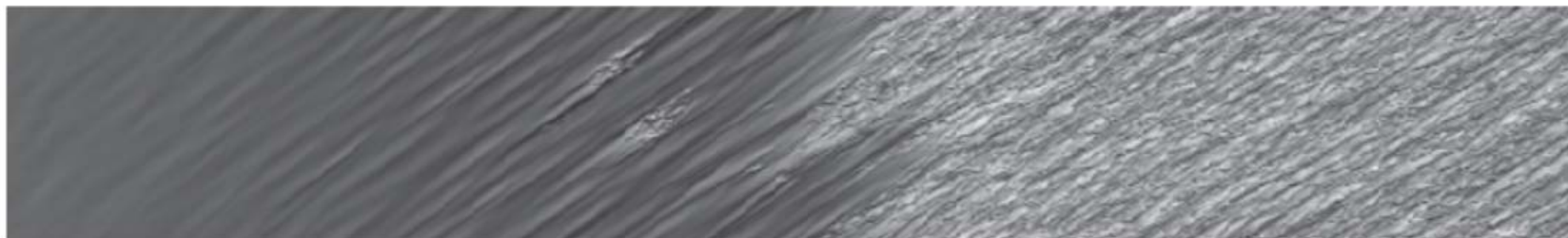
DNS, Univ. Stuttgart [Maucher, 2001]

Неустойчивость поперечного течения (cross flow instability, CF)

- В сложных трехмерных течениях (обтекание крыла) направление скорости у стенки и во внешнем потоке различаются
 - Профиль поперечной скорости имеет перегиб
 - ✓ Течение теряет устойчивость



— рост возмущений —
восприимчивость — переход —



ламинарная область

турбулентная область

LES расчеты для скользящей пластины при благоприятном градиенте давления и внешней турбулентности [Schrader et al, J. Fluid Mech. 646, pp.297, 2010].

Влияние разных факторов на переход

В реальных пограничных слоях на переход влияют различные факторы

- Увеличение (уменьшение) устойчивости пограничного слоя
 - Градиент давления
 - ✓ Положительный градиент дестабилизирует
 - Продольная кривизна поверхности
 - ✓ Вогнутая поверхность дестабилизирует
 - Вдув (отсос)
 - ✓ Вдув дестабилизирует
 - Температура стенки
 - ✓ В газе холодная стенка дестабилизирует
 - Эффекты сжимаемости
 - ✓ В жидкости холодная стенка стабилизирует
 - Благодаря изменению вязкости
- Внесение возмущений
 - Уровень турбулентности внешнего потока
 - Шероховатость стенки и турбулизаторы

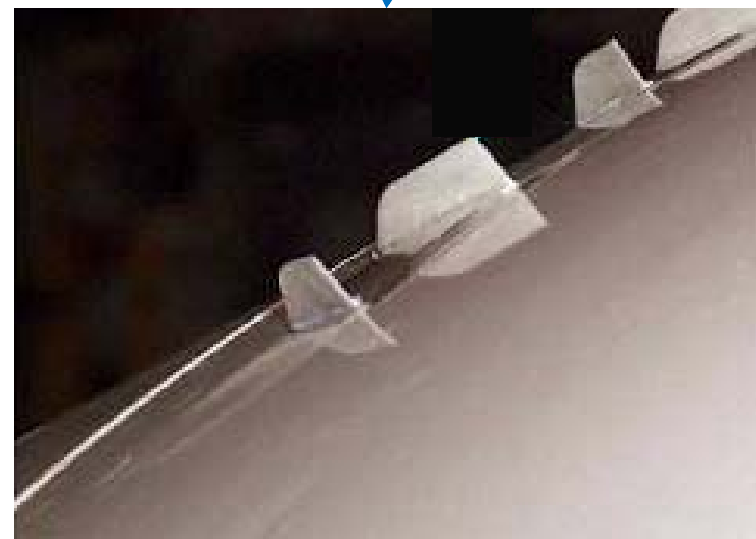
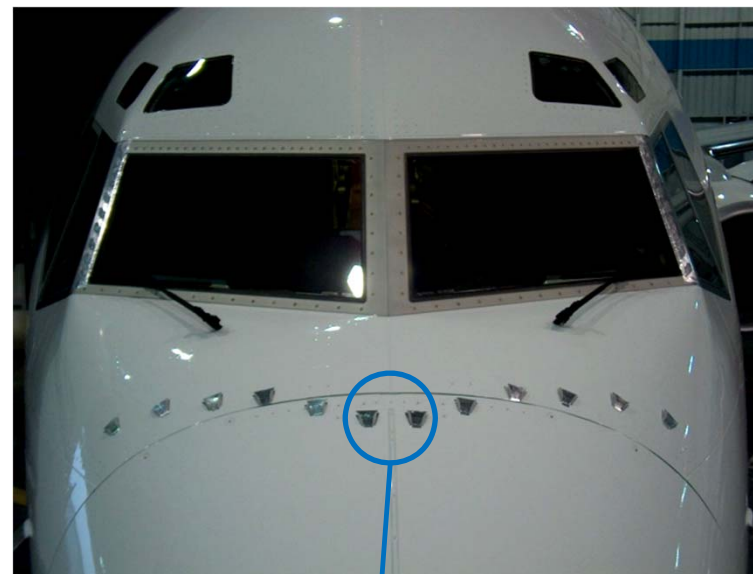
Турбулизаторы

- Турбулизаторы вносят возмущения в пограничный слой
 - Шероховатая стенка
 - Проволока в потоке
 - Уступ на поверхности
 - Вихрегенераторы



Происходит переход в пограничном слое

- Турбулизаторы применяются
 - Для обеспечения перехода в заданном месте
 - Для сокращения переходной области
 - Для управления пограничным слоем



Моделирование перехода

При моделировании перехода необходимо решить две задачи

- Определить место перехода
 - Переход принципиально не может быть описан в рамках полуэмпирической модели турбулентности
 - ✓ Переход определяется неустойчивостью ламинарного течения
 - Точка перехода должна быть получена из дополнительных соображений
 - ✓ Экспериментальные корреляции
 - ✓ Интегральные модели на основе теории устойчивости (метод e^n)
 - ✓ Модели перехода
- Описать переход в рамках выбранной модели турбулентности
 - Необходимо подавить генерацию характеристик турбулентности (v_t, K_t) в области выше по потоку от точки перехода
 - ✓ В сложных трехмерных течениях определение этой области является нетривиальной задачей
 - В окрестности точки перехода нужно обеспечить генерацию турбулентных характеристик
 - ✓ При этом трудно претендовать на описание характеристик течения в зоне перехода

Определение положения перехода в ПС

- Положение перехода определяется тем, какой из механизмов перехода (естественный, байпасный или пузырьковый) первым обеспечит достаточный уровень пульсаций в ПС
 - Для предсказания естественного перехода эффективны методы на основе линейной теории устойчивости (метод e^n , Drila)
 - Байпасный переход хорошо предсказывается при помощи эмпирических корреляций (зависимость положения перехода от уровня турбулентности потока и градиента давления)
 - Все эти подходы непригодны для современных CFD кодов
- Модели перехода
 - Базируются на локальных критериях
 - Можно выделить 3 семейства моделей, которые опираются на
 - ✓ Результаты линейной теории устойчивости (Corder)
 - Естественный переход
 - ✓ Анализ состояния ламинарного пограничного слоя при наличии возмущений (Walters, Kubacki&Dick)
 - Вынужденный переход
 - ✓ Эмпирические корреляционные функции (Menter и др.)
 - Наиболее универсальны

Резюме

- Причиной возникновения турбулентности в потоке является неустойчивость течения
- Чем выше число Рейнольдса, тем менее устойчиво течение и тем более вероятен переход к турбулентности
- Переход – сложное явление, он не происходит моментально и растянут в пространстве
- Дополнительные возмущения потока (шероховатость стенок, акустические возмущения, возмущения в набегающем потоке) ускоряют и интенсифицируют переход
- Для практических задач наиболее важен переход в пограничном слое, который бывает естественным, вынужденным и с образованием ламинарного отрывного пузыря