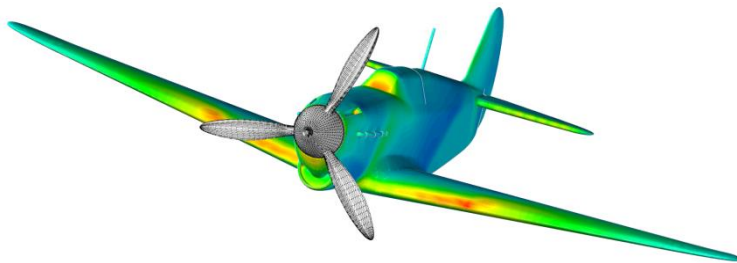


## Модуль 1. Введение



## Урок 2. Вычислительная гидродинамика

## Гидродинамика



- Теоретическая
- Экспериментальная

## Теоретическая гидродинамика

Поиск аналитических решений полной системы уравнений гидродинамики

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad \rho = \rho(P, T)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = \rho \vec{F} + \vec{\nabla} \cdot \hat{\Pi}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho E \vec{V}) = \rho \vec{V} \cdot \vec{F} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V} \cdot \hat{\Pi}) - \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_q$$

ЗАДАЧА ДО СИХ ПОР НЕ РЕШЕНА

## Экспериментальная гидродинамика

Проведение лабораторных экспериментов



АДТ-104, ЦАГИ



ГДТ-400, ЦАГИ



Камера  
сгорания

## ДАТЧИК ВЛИЯЕТ НА РЕЗУЛЬТАТ

## Экспериментальная гидродинамика

Проведение натурных экспериментов



Конус на F-15A



Обледенение SSJ-100

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ СТОЯТ ДОРОГО

## Вычислительная гидродинамика

Приближенное численное решение уравнений динамики жидкости

- Уравнения Навье-Стокса, теплоперенос
- Уравнения магнитной гидродинамики
- Уравнения Дарси-Бринкмана-Форхгеймера
- Решеточные уравнения Больцмана

## Вычислительная гидродинамика

Численное описание сопутствующих физико-химических процессов

- Турбулентность
- Химические реакции
- Горение
- Многофазные течения
- Фазовые переходы

## Вычислительная гидродинамика

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

## Эксперимент



ЛАБОРАТОРНЫЙ



НАТУРНЫЙ



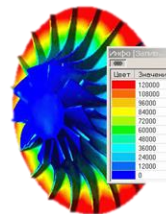
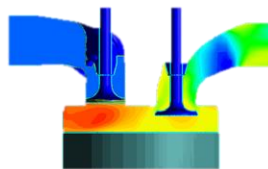
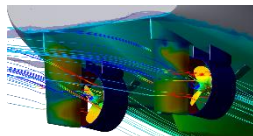
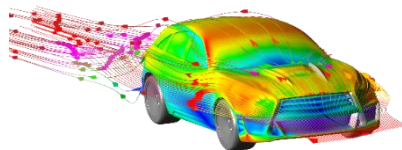
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ

## Преимущества CFD

- Моделирование условий течения, не воспроизводимых в эксперименте
- Чистота вычислительного эксперимента
- Наглядное представление результатов
- Доступность (нужен только компьютер)

## Области применения CFD

- Автомобилестроение
- Авиа- и ракетостроение
- Судостроение
- Двигателестроение
- Турбомашиностроение
- Атомная энергетика



## Области применения CFD

- Биотехнологии
- Медицина
- Метеорология
- Геология
- Исследования космоса

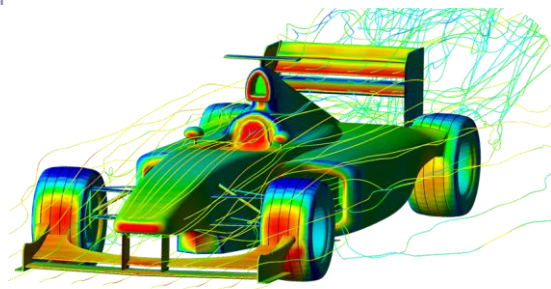
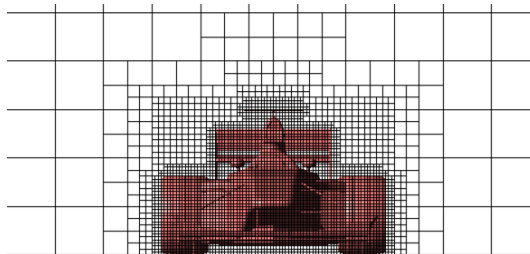


[www.freepik.com](http://www.freepik.com)

## Расчет аэродинамических характеристик автомобиля



[www.freepik.com](http://www.freepik.com)



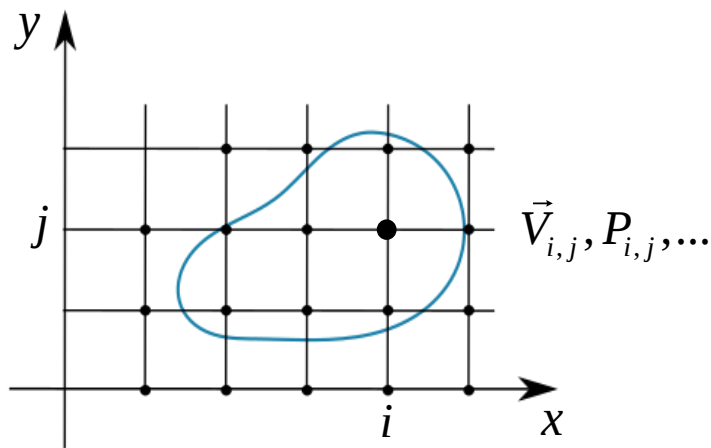
## Надёжны ли результаты CFD?

ДА, НАДЁЖНЫ ПРИ УСЛОВИИ, ЧТО

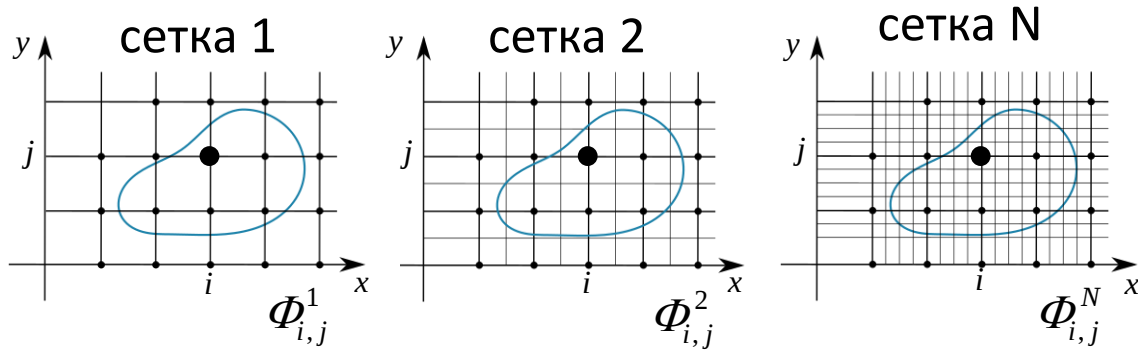
- Проведены необходимые исследования сходимости метода численного решения
- Проведены сравнения с экспериментом

## Сходимость. Метод сеток

Замена области решения дискретным  
множеством точек расчетной сетки



## Сходимость численного метода



СХОДИМОСТЬ:  $|\Phi_{i,j}^1 - \Phi(x, y)| < \dots < |\Phi_{i,j}^N - \Phi(x, y)| < \varepsilon$

## Пределы применимости CFD

Число Кнудсена

$$Kn = \frac{l}{L}$$

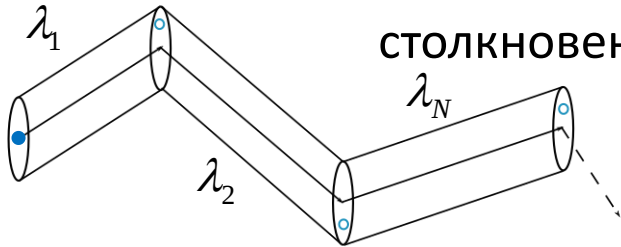
$l$  – средняя длина свободного пробега

$L$  – характерный размер задачи

## Средняя длина свободного пробега

### Кинетическая теория газов

столкновение 1



столкновение N

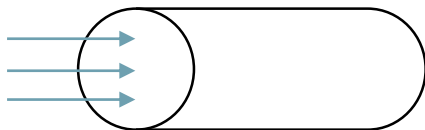
столкновение 2

$$l = \langle \lambda \rangle = \frac{\sum_{i=1, N} \lambda_N}{N}$$

## Характерный размер задачи

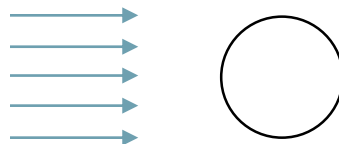
Параметры течения изменяются,  
например, на порядок величины

Течение в трубе



$$L = D_{\Gamma}$$

Обтекание цилиндра



$$L = d_{\text{цилиндра}}$$

## Пределы применимости CFD

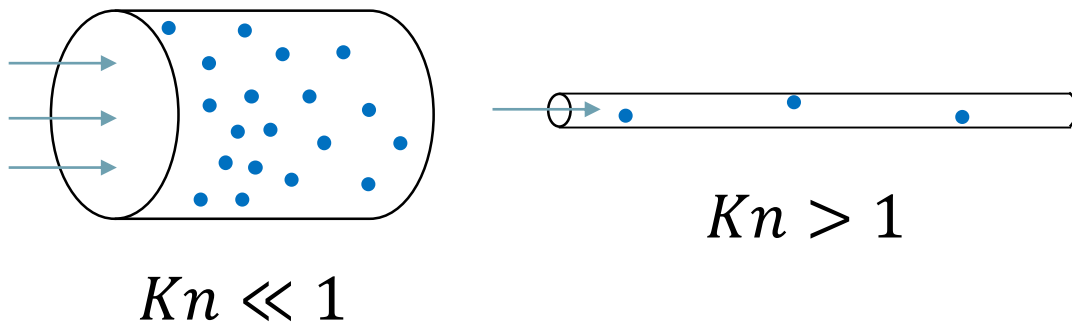
Сплошная среда:

$$Kn = \frac{l}{L} \ll 1$$

Есть гидродинамика разреженных газов

## Пределы применимости CFD

Течение газов в каналах и микроканалах



## На уроке мы узнали

Вычислительная гидродинамика –  
надежный (при соблюдении ряда  
требований) метод исследования  
процессов в сплошных средах

На следующем уроке

Современные инструменты CFD