

# Моделирование в Ansys Fluent

Лекция №1

Структура курса

Введение

Примеры CFD расчётов

Точность и достоверность CFD результатов

Ansys Fluent и Workbench

## Структура курса

## Цели курса

1. Знакомство с современными численными методами решения задач тепломассообмена.
2. Знакомство с коммерческим решателем Ansys Fluent.

## Структура

1. Лекции - теоретический материал и практическая демонстрация решения задач в Ansys Fluent.
2. Лабораторные работы - 8 штук.
3. Курсовая работа - типовые варианты или индивидуальное задание.
4. Экзамен.
5. Лабораторные работы - 8 штук. (второй семестр).

## Балльно-рейтинговая система

1. Лекции - посещение 2 балла.
2. Лабораторные работы - посещение 1 балл, защита - 1-4 балла.
3. Курсовая работа/контрольная работа - 3-31 балл к итоговым баллам.
4. Отдельно курсовая работа - 100 баллов.
5. Автомат: 90 баллов и выше.

# Что необходимо знать?

S  P  E  C  I  A  L  Инженер  
 alma  Another  CFD специалист

Almost Perfect

English language 2  
 Mathematical analysis 0  
 Linear algebra 3  
 Heat exchange 0  
 Thermodynamics 0  
 Aerodynamics 4  
 Boundary layer theory 0  
 Programming 0  
 Console 0  
 CAD systems 0  
 Data processing 0

Requires: Level -4 курс

## Навыки

2 PERKPOINTS AVAILABLE      S:1 | P:1 | E:1 | C:1 | I:1 | A:1 | L:1      SKILLPOINTS AVAILABLE

LEVEL 2 [Enter] LEARN PERK

## Введение



## Что такое CFD

- ▶ Решение уравнений гидродинамики (Навье-Стокса) и теплообмена (уравнение энергии), дополненных математическими моделями других физических процессов (турбулентность, химические реакции, многофазность, излучение и т.д.).
- ▶ Идея – дискретизация пространства на набор ячеек. Метод Контрольного Объема, Метод Конечных Элементов.
- ▶ Главная численная проблема – решение системы нелинейных алгебраических уравнений с очень большой размерностью и с разреженной матрицей.
- ▶ Практическая реализация – программные комплексы или CFD коды.

## История CFD

- ▶ **Начало – 1910 г.** Л.Ричардсон, доклад Королевскому обществу «Итерационные методы решения конечно-разностных уравнений Лапласа»:
  - ▶ ручной счет ( $n/18$  пенсов за узел,  $n$  – число значащих цифр);
  - ▶ лучшая девушка – 2000 узлов/неделю;
  - ▶ Применение: расчет напряжений в каменной дамбе.
- ▶ **50-70 годы** – чисто научные исследования для проверки и отладки численных алгоритмов. Создаются первые коды на Фортране. Применение: написание диссертаций.
- ▶ **80 годы** - первый универсальный коммерческий код PHOENICS, предназначенный для решения широкого круга задач; 2D задачи с числом ячеек порядка 100 тыс.

## История CFD

- ▶ **90 годы** – появляется большое число универсальных кодов (StarCD, Fluent, Ansys/CFX, Flow3D). Применение: не только для научных исследований, но и для решения практических инженерных задач. Число узлов сетки < 1 млн.
- ▶ **2000 годы** – появление открытых CFD кодов (OpenFOAM). Совершенствование численных алгоритмов на основе параллельных вычислений. Переход к уровню узлов сетки порядка 10 – 50 миллионов ячеек.
- ▶ **201X годы** – Пока следующие тенденции:
  - ▶ Все больше и больше число узлов сетки – текущая отметка 1 млрд. ячеек;
  - ▶ Попытки использовать облачные технологии;
  - ▶ CFD фирмы объединяются – Ansys+Fluent+Cart3D и создают «монстров»;
  - ▶ Платные или бесплатные коды – развитие OpenSource и GNU движения.

## Классификация CFD кодов

[www.cfd-online.com/Wiki/Codes](http://www.cfd-online.com/Wiki/Codes)

- ▶ Теплогидравлические коды
  - ▶ TRAC, Relap, Корсар.
  - ▶ одномерные уравнения теплогидравлики, двухфазный поток (пар+вода), широкий набор межфазных моделей пар-вода, пар-стенки (кипение), геометрия расчетной области – произвольная сеть одномерных компонентов
- ▶ Универсальные коммерческие коды:
  - ▶ Fluent, STAR-CD, Ansys-CFX, Phoenics, Flow-3D, FlowVision и др.
  - ▶ Цена: от \$1000 – до \$200 000 (с годовым обновлением).
- ▶ Универсальный Российский код – LOGOS (ЛОГОС-Саров)
- ▶ Универсальные открытые коды:
  - ▶ OpenFOAM, Code Saturne.
- ▶ Научно-исследовательские и учебные коды:
  - ▶ Caffa, Dolfyn, Anes, ... (ОС – чаще Linux, цена –бесплатные).

## Области применения CFD в промышленности

- ▶ Аэрокосмическая: внешнее обтекание;
- ▶ Автомобилестроение: внешние и внутренние течения в авто;
- ▶ Архитектура и строительство: внешние и внутренние течения;
- ▶ Турбомашины;
- ▶ Двигатели внутреннего сгорания: оптимизация смешения топлива и воздуха в цилиндре;
- ▶ Химическая;
- ▶ Metallургия и создание новых материалов;
- ▶ Энергетика;
- ▶ Медицина: течение крови и воздуха в сосудах человека;
- ▶ и других.

## Примеры CFD расчётов

## Аэрокосмическая промышленность (Cart3D)

Сверхзвуковое обтекание шатла (число Маха = 2.5)

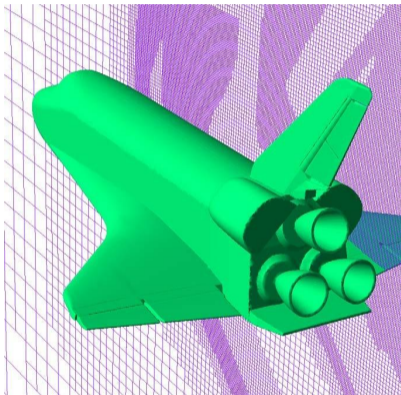


Рис.: Сетка ячеек (Контрольных Объемов)

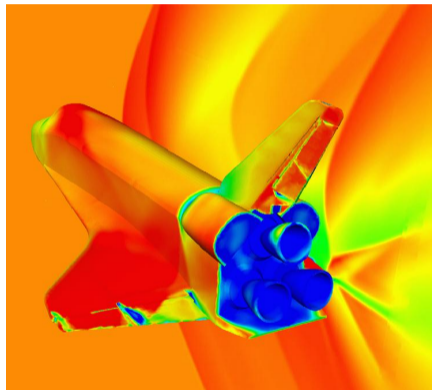


Рис.: Поле давления

## Автомобильная промышленность (Fluent)



Рис.: Линии тока и поле давления

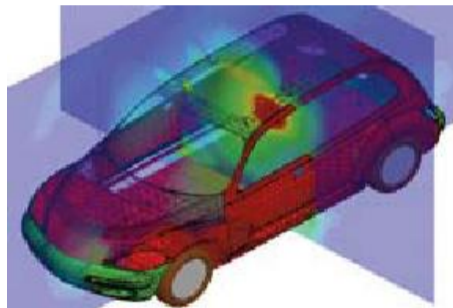


Рис.: Поле температур внутри автомобиля



## Двигатели внутреннего сгорания

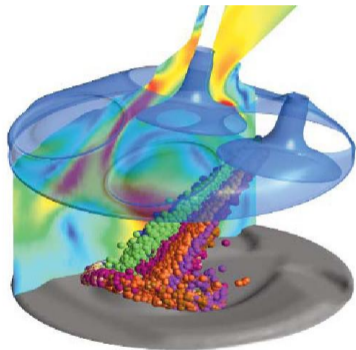


Рис.: Линии тока и поле температуры (Fluent)

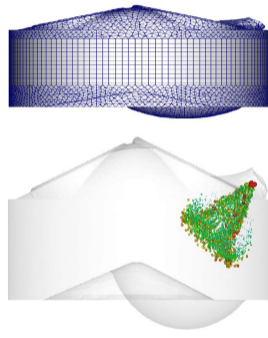


Рис.: Сетка КО, линии тока (OpenFOAM)

## Точность и достоверность CFD результатов

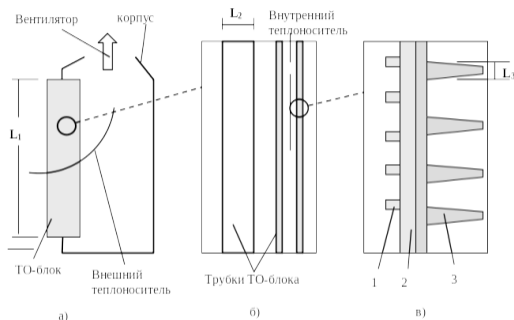
### Три взгляда на CFD технологию

- ▶ *Оптимисты* – обычно это продавцы кодов. Современный CFD код+суперкомпьютеры – это виртуальная экспериментальная установка! Коды настолько верифицированы, а представление результатов настолько реалистично, что все инженерное моделирование в любой области легко получить не отходя от дисплея.
- ▶ *Пессимисты* – обычные инженеры. Картинки из демо-примеров действительно красивые, но:
  - ▶ мы не поняли как напрямую посчитать наш теплообменник.
  - ▶ линии тока правдоподобные, но когда мы с большим трудом посчитали коэффициент теплоотдачи, то обнаружили – он в два раза ниже, чем экспериментальный.
  - ▶ и.т.д
- ▶ Реалисты – специалисты, которые понимают, что CFD – это приближенный инструмент, которым нужно правильно пользоваться и понимать что можно, а что нельзя смоделировать.
- ▶ *Гуру-Сполдинг* - CFD подобен Дельфийскому Оракулу:
  - ▶ Его предсказания не 100 % (а иногда вообще неправильные),
  - ▶ Но за это нужно платить деньги (и немалые).

### Факторы, влияющие на точность и достоверность CFD результатов

- ▶ *Дискретность пространства в CFD:* Реальное пространство непрерывно, в CFD пространство расчета (расчетная область) разбивается на дискретный набор ячеек, поля и свойства среды в которых считаются постоянными. Для уменьшения этих ошибок необходимо использовать как можно более мелкие ячейки расчетной области.
- ▶ *Турбулентность:* В большинстве практических задач характер течения потока является турбулентным. Хотя турбулентность достаточно хорошо изучена и до некоторой степени учитывается в программных CFD кодах, однако ни в одном случае полная адекватность реальности пока не достигнута.
- ▶ *Математические модели физических процессов:* В практических задачах наряду с моделированием процессов переноса массы, импульса и энергии (что собственно и моделирует «чистая» CFD) необходимо моделировать и более сложные физические процессы: химические реакции, процессы горения, перенос излучения, двухфазные течения с фазовыми переходами (кипение и конденсация в трубах) и т.п. Степень детальности (и достоверности) математических моделей этих процессов варьируется в широких пределах. Для использования в CFD отбираются приближенные модели, стараясь выполнить баланс «точность модели» - «время расчета».

## Пример – проблема дискретности пространства



- ▶ Число узлов, необходимое для прямого моделирования ВТО –  $10^{10}$  ячеек.
- ▶ Подход реалиста – приближенная «пористая модель» (Space Average CFD)

## Пример – турбулентность

- ▶ **Способ описания:** Для большинства задач достаточно осредненных уравнений Рейнольдса. Нужно смоделировать дополнительный турбулентный перенос импульса и тепла:

$$\tau_t = \rho \overline{U'_x U'_y}, \quad q_t = -\rho c_p \overline{U'_x T'} \quad (1)$$

- ▶ **Математические модели:**
  1. Алгебраические модели для коэффициентов турбулентной вязкости (Прандтль, Рейхард, Попов).
  2. Многопараметрические модели (k-ε модель).
  3. Прямое численное моделирование (DNS, LES).

## Пример – турбулентность

▶ **Проблемы:**

- ▶ *алгебраические* – только для простых геометрий (труба, канал);
- ▶  $k - \epsilon$  модель с пристенными функциями – «большие» ячейки у стенки ( $y^+ > 40$ );
- ▶ низкорейнольсовская  $k - \epsilon$  модель – «маленькие» ячейки у стенки ( $y^+ < 1$ )
- ▶ прямое моделирование – нужны мелкие сетки; для простых геометрий время расчета одного варианта – *недели!*

## Когда можно(нужно) использовать CFD-коды

- ▶ Когда эксперимент дороже, чем расчёт.
- ▶ Когда эксперимент невозможен:
  - ▶ Типичный пример – тяжёлая запроектная авария на ядерном реакторе (Запроектная – это разрушение АЭС).
  - ▶ «Случайные» эксперименты – Три Майл Айленд (США, 1979), Чернобыль – 1986, СССР, Фукусима – 2011.
  - ▶ Эксперимент дороже (виртуальный пример-форсированный конденсатор):
    - ▶ Оценки: CFD код Ansys/Fluent: 100 т. евро = 4 млн. р. Ваш гениальный труд: 12 мес. \* 100 тыс. = 1.2 млн. р. Итого: 5.2 млн.р.
    - ▶ Эксперимент: Стоимость конденсатора – 100 млн. р. (нужно два экземпляра). Стоимость экспериментального участка + макета + эксперимент – 5-10 млн. р. Число экспериментальных серий - 10.



## Ошибка численного моделирования

$$\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_{bc} + \varepsilon_d + \varepsilon_i + \varepsilon_s + \varepsilon_u$$

$\varepsilon_m$  Адекватность физической модели

$\varepsilon_{bc}$  Неопределённость постановки граничных условий

$\varepsilon_d$  Дискретный аналог

$\varepsilon_i$  Итерационный решатель

$\varepsilon_s$  Расчётный код

$\varepsilon_u$  Пользователь

Для решения необходимо соблюдение условия:

$$\varepsilon_m > \varepsilon_{bc} > \varepsilon_d > \varepsilon_i > \varepsilon_s > \varepsilon$$

## Валидация и верификация кода

- ▶ **Верификация** - процесс, в ходе которого определяются ошибки некорректной реализации концептуальных моделей, ошибки во входных и других данных, а также неточности реализации программного кода.  
(Процесс определения соответствия ПО КМ математической модели. Верификация обеспечивает обоснование того, что ПО КМ при определённых параметрах рассчитывает математическую модель правильно и с соответствующей точностью.)
- ▶ **Валидация** - процесс, в ходе которого определяется степень точности, с которой модель отображает объективную реальность с точки зрения предполагаемого использования физико-математической модели, заложенной в код.  
(Процесс определения соответствия программного обеспечения и компьютерной модели реальному миру, который обеспечивает обоснование того, что программное обеспечение в заявленной области применения позволяет правильно и с определённой точностью моделировать реальные процессы.)

## Валидация и верификация кода

- ▶ Важный этап на пути промышленного внедрения разрабатываемых инженерных пакетов программ.
- ▶ Калибровка коэффициентов моделей, в ходе которой осуществляется регулирование числовых или физических параметров модели с целью лучшего соответствия экспериментальным данным.
- ▶ Организация централизованного хранения банков данных и результатов их выполнения.
- ▶ Систематизация знаний в различных областях науки и техники.
- ▶ В отечественной инженерной практике процессы верификации и валидации CFD-программ не стандартизованы.

- ▶ Процесс валидации начинается с создания валидационного базиса, который является упорядоченной системой данных, содержащих результаты натуральных экспериментов и результаты компьютерного моделирования. Указанный базис позволяет доказать соответствие ПО КМ объекту моделирования (ГОСТ Р57700.23-2020)
- ▶ Ключевым условием проведения валидации является наличие тестового примера и согласованных на экспертном уровне "доверительных интервалов".






- ▶ Контроль сходимости решения к стационару с минимальной заданной наперёд невязкой;
- ▶ Контроль сходимости к решению по шагам расчётной сетки с определением порядка точности метода (процедура Ричардсона);
- ▶ Контроль соответствия результатов, полученных различными авторами с применением различных методов (при выполнении условий выше);
- ▶ Контроль ”выхода” решения на точные закономерности в том случае, когда таковые в данной задаче существуют.

- ▶ ГОСТ Р 57188-2016 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения.
- ▶ ГОСТ Р 57700.1-2017 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Требования.
- ▶ ГОСТ Р 57700.2-2017 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения.

## Дополнительная информация

- ▶ Код ANES <http://anes.ch12655.tmweb.ru/>
- ▶ Список существующих CFD кодов (включая бесплатные) - CFD-википедия
- ▶ <https://support.ansys.com>
- ▶ Сайт компании-официальный дистрибьютор ПО ANSYS:  
<https://www.cadfem-cis.ru>
- ▶ ГК «ПЛМ Урал» – интегратор передовых CAD/CAE/CAM/CAI/QMS/PDM:  
<https://www.plm-ural.ru>
- ▶ CFD NINJA / ANSYS CFD
- ▶ Теоретическая основа настоящего курса: [Fluid Mechanics 101](#)
- ▶ Различная информация по численному моделированию: <https://magicdpd.ru>

## Литература

-  Ferziger Joel H and Milovan Peric.  
*Computational Methods for fluid Dynamic.*  
2002.
-  Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., and Захарова Ю. В.  
*Основы работы в ANSYS 17.*  
2017.
-  Л.С. Шаблей, А.В. Кривцов, and Д.А. Колмакова.  
*Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в Ansys Fluent.*  
2017.
-  В.А. Бруяка.  
*Инженерный анализ в Ansys Workbench. Часть 1.*  
2010.
-  А.М. Зиганшин.  
*Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач в процессоре Fluent.*  
2013.



## Ansys Fluent и Workbench

## Лицензионная политика Ansys

- ▶ Стоимость лицензии (на 2021 г.):
  - ▶ Академическая - порядка 300.000 руб. за 1 место. Техподдержка - порядка 60.000 руб.
  - ▶ Коммерческая - в зависимости от подключённых модулей - 1.5 - 6 млн. Техподдержка - порядка 20% от стоимости лицензии.
  - ▶ Студенческая - бесплатно. Ограничение сетки - 512.000 элементов.
  - ▶ Лицензия на прокат. Подробности: компания CADFem.

## Интерфейс WorkBench

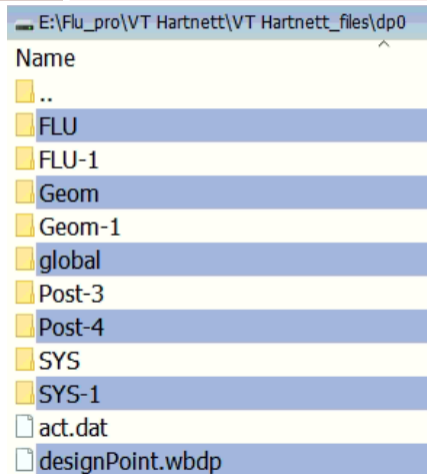
The screenshot shows the Ansys Workbench interface with the following components:

- Project Navigator:** Displays a hierarchical view of the project including Analysis Systems (Fluid Flow, Fluid Flow-Adapt, Fluid Flow-Dyno, Fluid Flow-Flare, Fluid Flow-PrePost, IC Engine, Turbomachinery Fluid Flow), Component Systems (Revision, CPU, Engineering Data, Meshing (Static), Material Models, Mesh, Meshing (Static), Meshing (Dynamic)), Geometry (Geometry), Meshing (Mesh), Simulation (Simulation), and Design Exploration (Design Exploration).
- Analysis System Diagram:** A flowchart showing the simulation setup. It includes a geometry input (A0) leading to a meshing process (A1), which is copied multiple times (A1.1 to A1.5). The meshing process feeds into fluid flow analysis systems (A2, A2.1 to A2.5). A2.1 is labeled "without radiation".
- Properties of Schematic: A2.1 Solution:** A table of configuration parameters for the simulation.
- Messages:** A log window showing error messages related to Fluent handling.

ID	Property Name	Value
1	Reports	
2	Copy of	
3	Component ID	Solution-40
4	Directory Name	FLU-40
5	Use Setup Launcher Settings	
6	Process	Double Precision
7	Batch Launcher at StartUp	
8	Display Mesh After Reading	
9	Edit and Graphs Windows	
10	Use Workbench Color Scheme	
11	Load ACT Start Page	
12	Environment Path	
13	Setup Completion Environment for UDF	
14	Use Job Scheduler	
15	Run Parallel Version	
16	UDF Completion Script Path	\$FLUENT_ROOT\BIN\MSD\%ofLast
17	Initialization Method	Use Solution Data from File
18	Initial Data File	C:\Fluent\Workbench\73_Workbench\73_Workbench\FLU-40\Fluent\73-74\c600.dat.gz
19	Use Dynamic Mesh Nodes	
20	Solution Monitoring	
21	Generate Solution Monitor Plots for Report	
22	Data Interpolation	
23	Generate Post Processing Images	
24	Notes	
25	Notes	
26	License	
27	License	
28	Parallel Run Settings	
29	Number of Processors	5
30	Distributed	Default
31	MPI Type	Default
32	Use Shared Memory	
33	Subdomain Processes	
34	Update Option	Run in Background

ID	Text	Association	Date/Time
1	Trace		
2	Error! Failed in handling Fluent message.		07.07.2025 10:23:00
3	Error! Failed in handling Fluent message.		07.07.2025 10:23:01
4	Error! Failed in handling Fluent message.		08.07.2025 22:08:28
5	Error! Failed in handling Fluent message.		08.07.2025 00:03:05
6	Error! Data entity not found: Schematic\System.FLU-40		05.07.2025 11:10:05

## Структура проекта WorkBench



- ▶ Путь к проекту только на **АНГЛИЙСКОМ!** Имя пользователя - только на **АНГЛИЙСКОМ!**
- ▶ **FLU** - содержит файлы Fluent \*.cas и \*.dat (могут быть заархивированы).
- ▶ **Geom** - файлы модуля геометрии.
- ▶ **Post** - файлы постобработчика.
- ▶ **SYS** - файлы сеткопостроителя.

## Замеченные баги и ограничения

- ▶ Модуль **Geometry**: периодически возникают проблемы при создании геометрии с высоким аспектным соотношением (размеры >600 метров по одному из измерений.)
- ▶ Модуль **Results**: количество точек на одну линию, по которой выводятся профили - не больше 1000.
- ▶ **Общее**: объём системного диска: свободного места на диске должно быть больше объёма оперативной памяти, т.к. вне зависимости от директории куда записываются данные, сначала идёт запись во временную директорию.
- ▶ **Общее**: при повторном запуске после зависания - исчезают все данные, полученные с момента предыдущего запуска. Автосохранение в данном случае не спасает.