

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?

The screenshot shows a skill menu for the perk 'Almost Perfect'. At the top, there are checkboxes for 'S', 'P', 'E', 'C', 'I', 'A', 'L' and the text 'Инженер'. Below that is a search bar with 'almost' and checkboxes for 'Another' and 'CFD специалист'. The perk name 'Almost Perfect' is highlighted. In the center is a cartoon character giving a thumbs up, with the text 'Requires: Level -4 курс' below it. On the right is a list of skills with their current levels and arrows to increase or decrease them:

- Английский язык: 2
- Математический анализ: 0
- Линейная алгебра: 3
- Тепломассообмен: 0
- Термодинамика: 0
- Аэродинамика: 4
- Теория пограничного слоя: 0
- Программирование: 0
- Консоль: 0
- CAD системы: 0
- Обработка данных: 0

At the bottom, the word 'Навыки' is displayed in large letters. Below it are two large numbers '2' representing 'PERKPOINTS AVAILABLE' and 'SKILLPOINTS AVAILABLE'. At the very bottom, there is a 'LEVEL 2' progress bar and a button that says '[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

- ▶ 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)

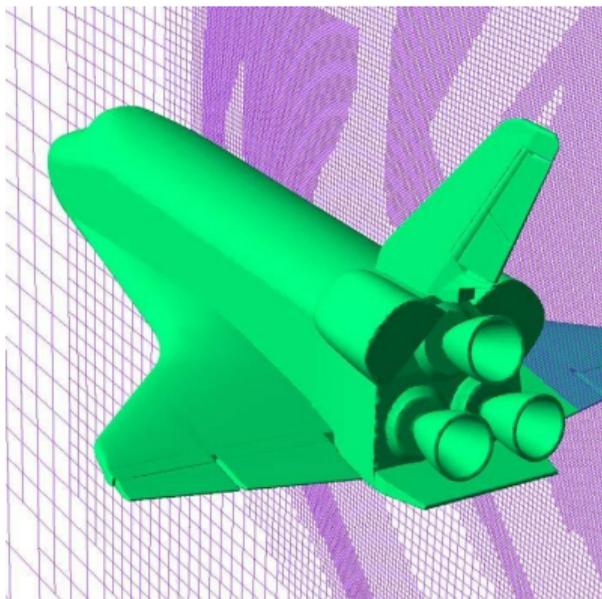


Рис.: Сетка ячеек (Контрольных Объемов)

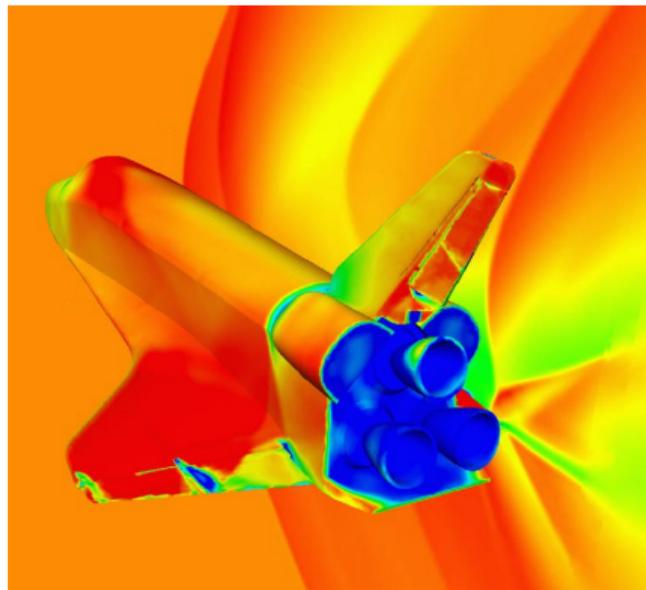


Рис.: Поле давления

Автомобильная промышленность (Fluent)

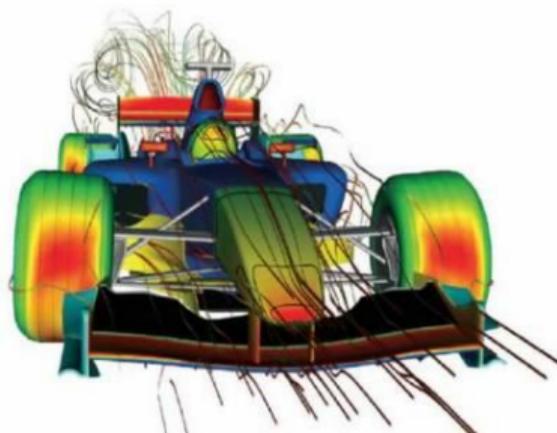


Рис.: Линии тока и поле давления

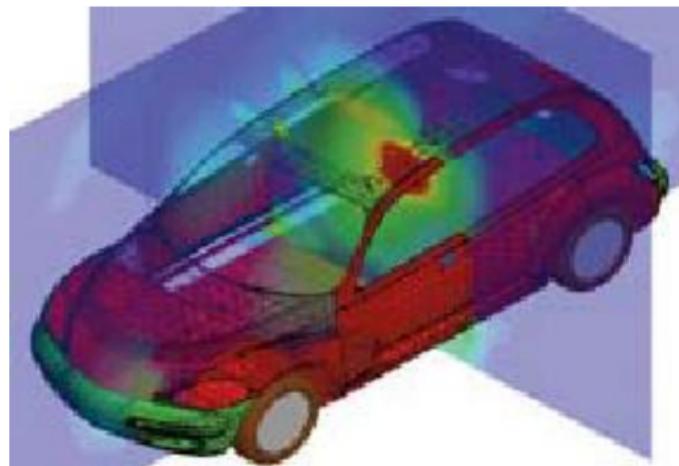


Рис.: Поле температур внутри автомобиля

Двигатели внутреннего сгорания

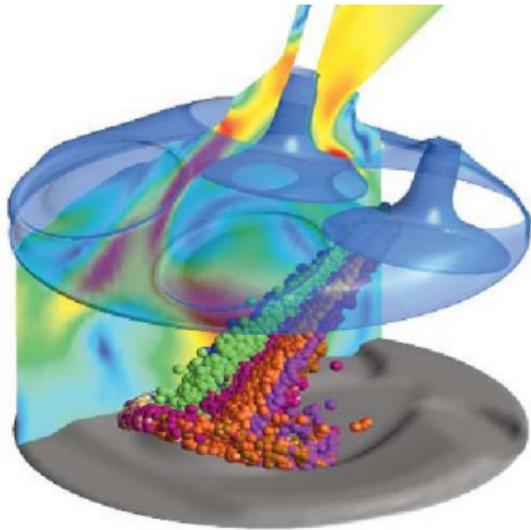


Рис.: Линии тока и поле температуры (Fluent)

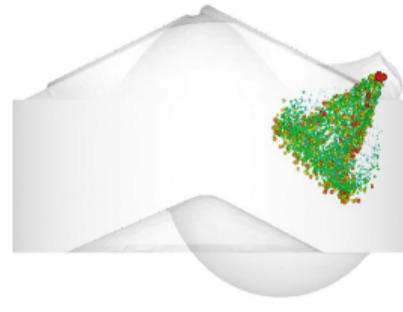
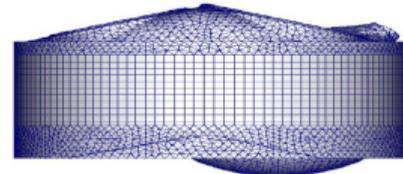


Рис.: Сетка КО, линии тока (OpenFOAM)

Точность и достоверность CFD результатов

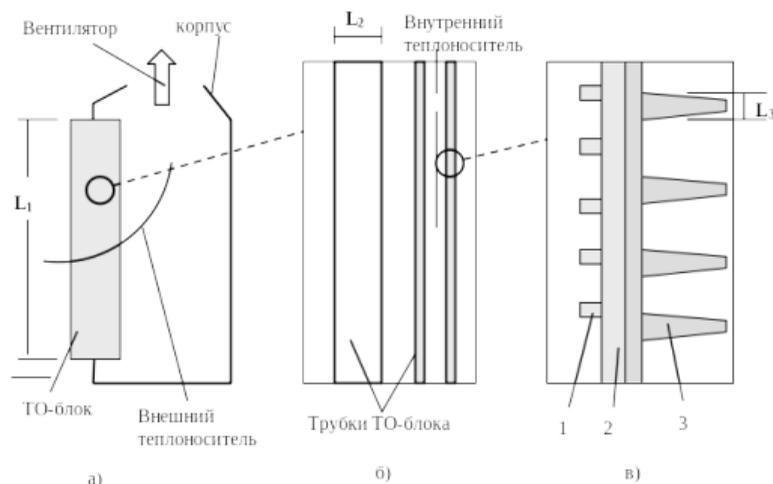
Три взгляда на CFD технологию

- ▶ *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

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

ε_m Адекватность физической модели

ε_{bc} Неопределённость постановки граничных условий

ε_d Дискретный аналог

ε_i Итерационный решатель

ε_s Расчётный код

ε_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

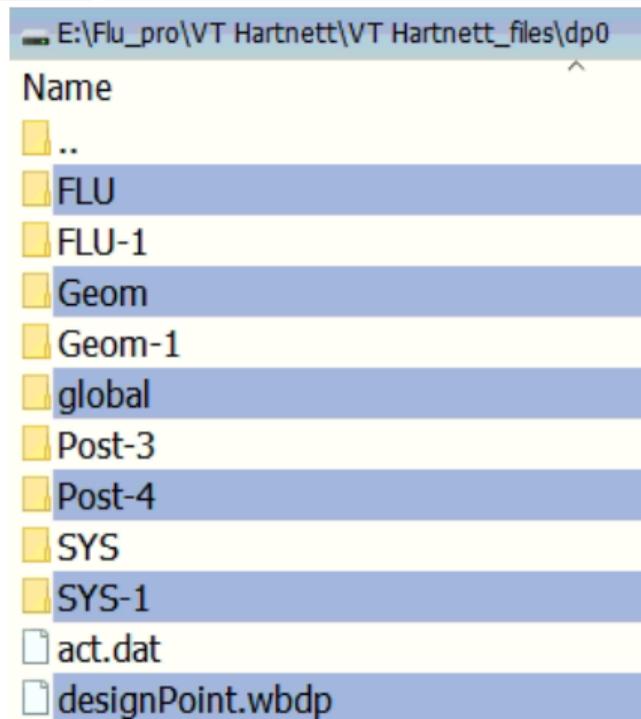
-  Ferziger Joel H and Milovan Peric.
Computational Methods for fluid Dynamic.
2002.
-  Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., and Захарова Ю. В.
Основы работы в ANSYS 17.
2017.
-  Л.С. Шаблей, А.В. Кривцов, and Д.А. Колмакова.
Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических 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.

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.